



OTIMIZAÇÃO DE OPERAÇÃO DE UM SISTEMA ENERGÉTICO DE HABITAÇÃO DOMÉSTICA COM AUTOPRODUÇÃO FOTOVOLTAICA, VEÍCULO ELÉTRICO E BOMBA DE CALOR

LUIS PEDRO SANTOS DANTAS TAVEIRA TORRES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA

À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM

ÁREA CIENTÍFICA

ENGENHARIA ELETROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

A Dissertação intitulada

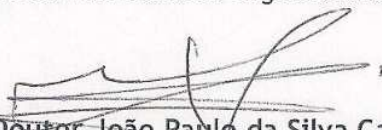
“Otimização de Operação de um Sistema Energético de Habitação Doméstica, com Autoprodução Fotovoltaica, Veículo Elétrico e Bomba de Calor”

foi aprovada em provas realizadas em 17-07-2015

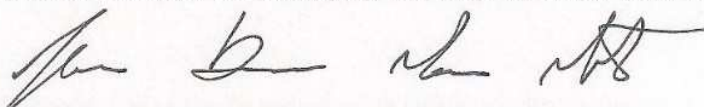
o júri



Presidente Professor Doutor Vladimiro Henrique Barrosa Pinto de Miranda
Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professor Doutor João Paulo da Silva Catalão
Professor Auxiliar C/Agregação do Departamento de Engenharia Eletromecânica da Faculdade de Ciências de Engenharia da Universidade da Beira Interior



Professor Doutor Cláudio Domingos Martins Monteiro
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.



Autor - Luís Pedro Santos Dantas Taveira Torres

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

© Luis Torres, 2015

Resumo

Ao nível do setor doméstico, os elevados consumos de eletricidade associados às diferentes necessidades dos consumidores são uma realidade que consequentemente levam a indesejados custos elevados relativos à fatura da eletricidade. Para que os diferentes consumidores domésticos usufruam da enorme diversidade de equipamentos presentes ao nível deste setor com uma plena satisfação sem desperdícios de energia e com baixos custos, é necessário implementar medidas de eficiência energética, assim como contribuir para uma maior penetração de tecnologia de carácter limpo e eficiente.

Neste sentido surge a necessidade de implementação de sistemas de otimização preditiva de operação para uma casa inteligente que, através de uma coordenação dos diferentes equipamentos responsáveis pelo consumo de energia da mesma, permitam deslocar estes consumos de forma a minimizar o custo associado aos mesmos. Existem já diversas otimizações efetuadas neste sentido, embora não exista uma solução geral uma vez que cada fabricante se foca em aspectos diferentes. Neste trabalho de dissertação é desenvolvido um sistema de otimização preditiva de operação para uma casa inteligente que contém autoprodução fotovoltaica como forma de produção local de energia elétrica, veículo elétrico para satisfação das necessidades de deslocamento do consumidor e que é associado a um sistema *Vehicle-to-Grid*, e uma bomba de calor com o objetivo de satisfazer as necessidades de climatização do consumidor doméstico, assim como proporcionar o aquecimento de águas quentes sanitárias. É também introduzido no sistema de otimização armazenamento local de energia através de um sistema de armazenamento por baterias.

O valor deste trabalho de dissertação reside no modo como o sistema de otimização é implementado. A gestão de eficiência energética desenvolvida é baseada em programas de *Demand Response*, sendo utilizadas tarifas dinâmicas para o cálculo associado aos custos da faturação da eletricidade. Relativamente ao algoritmo de otimização, este é implementado através de uma heurística referente ao cálculo de custos marginais.

De forma a avaliar o impacto do sistema de otimização desenvolvido na satisfação dos objetivos delineados, foram criados diversos cenários com diferentes características de operação que permitem que seja efetuada uma comparação dos resultados finais obtidos

referentes a cada um deles, assim como avaliar o impacto que as diferentes tecnologias presentes ao nível do sistema energético de habitação doméstica têm no sistema de otimização desenvolvido.

O sistema de otimização é implementada através da linguagem de programação Visual Basic for Application, sendo que o tratamento de dados é efetuado através da ferramenta Microsoft Office Excel.

Palavras-chave: Sistema de otimização preditiva, *Home Energy Management*, Tarifas dinâmicas, Autoconsumo , Veículo Elétrico, Bomba de Calor, Sistema de Armazenamento por Baterias, Heurística.

Página em branco

Abstract

At the domestic sector, high electricity consumption associated with the different needs of users are a reality that consequently lead to unwanted high costs of electricity bill. So that different domestic users to enjoy the huge variety of equipment present at the level of this sector with a full satisfaction without energy waste and lower costs, it is necessary to implement energy efficiency measures, as well as contribute to greater penetration of clean and efficient equipment.

In this sense there is a need to implement operation of predictive optimization systems for intelligent home which, through coordination of different equipment responsible for this power consumption level of the same, may move these consumptions to minimize the associated cost. There are several optimizations that already done this, although there is no general solution since each manufacturer focus on different aspects. In this master thesis we develop a predictive optimization of system operation for a smart home that contains photovoltaic self-production as a means of local production of electric energy, electric vehicle to meet the user's needs shift associated with a Vehicle-to-Grid system and a heat pump to meet the cooling needs of the domestic user, as well as water heating. It is also introduced into the optimization system a local energy storage through a storage system by batteries.

The value of this dissertation lies in the way the optimization system is implemented . The developed energy efficiency management is based on Demand Response programs and are used to calculate dynamic rates associated with the electricity billing costs. For the optimization algorithm , this is implemented through a heuristic calculation regarding the marginal costs.

In order to assess the impact of the optimization system developed in meeting the goals outlined, were created different scenarios with different characteristics of operation thus allowing the comparison of the different final results obtained, as well as assess the impact of different technologies present at the level of the energy system of domestic housing have in the optimization system developed.

The optimization system is implemented using Visual Basic for Applications programming language, and data processing is performed using Microsoft Office Excel tool.

Keywords: Predictive Optimization System, Home Energy Management, Dynamic Rates, SelfConsumption, Electric Vehicle, Heat Pump, Batteries Storage System, Heuristic.

Página em branco

Agradecimentos

Este trabalho de dissertação representa o fim de um ciclo acadêmico e o início de uma nova etapa pessoal. Com este pequeno texto pretendo expressar os meus mais profundos agradecimentos a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para que tudo tenha decorrido sempre pelo melhor e que tenha sempre conseguido alcançar os meus objetivos.

Aos meus pais e às minhas irmãs quero agradecer por todo o carinho, amor, dedicação e confiança que me transmitiram ao longo de toda a minha vida, os quais foram fundamentais para ter chegado onde cheguei.

Ao meu orientador, professor Cláudio Monteiro, quero agradecer por toda a sua disponibilidade, acompanhamento, sabedoria e pelo seu entusiasmo que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho de dissertação.

À minha coorientadora, professora Maria do Rosário Pinho, quero agradecer por toda a ajuda e dedicação que me transmitiu sempre.

À minha namorada quero agradecer por estar sempre do meu lado, motivando-me e aconselhando-me sempre que necessito e por celebrar comigo todos os feitos que juntos temos alcançado.

Por fim e não menos importante, quero agradecer a todos os meus amigos por todos os momentos inesquecíveis que partilhamos juntos e que marcarão para sempre a minha vida.

Muito Obrigado.

Página em branco

Índice

Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Contextualização	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Descrição do documento	4
1.5 Ferramentas Computacionais Utilizadas	4
Capítulo 2	5
Estudo do Estado da Arte	5
2.1 Introdução	5
2.2 Autoconsumo fotovoltaico	8
2.3 Veículo Elétrico	13
2.4 Bomba de Calor	17
2.5 Sistemas de Armazenamento - Tecnologia de Baterias	21
2.6 Gestão da Eficiência Energética em habitações domésticas	29
2.7 Otimização energética de uma habitação doméstica	43
Capítulo 3	52
Modelização dos diversos componentes	52
3.1 Formulação do problema	52
3.2 Modelização das cargas típicas	55
3.3 Modelização do Sistema Fotovoltaico - Autoconsumo	60
3.4 Modelização do Veículo Elétrico	62
3.4 Modelização do Sistema de Armazenamento por Baterias	65
3.5 Modelização da Bomba de Calor	67
Capítulo 4	74
Algoritmo referente ao sistema de otimização	74
4.1 Modelo matemático	74
4.2 Descrição do algoritmo implementado no sistema de otimização	76
Capítulo 5	88
Resultados obtidos	88
5.1 Simulador implementado	88
5.2 Resultados obtidos	89
Capítulo 6	114
Conclusão	114

6.1	Conclusões gerais	114
6.2	Satisfação de objetivos	115
6.3	Trabalhos futuros	116

Lista de figuras

Figura 1.1 - Representação dos consumos de energia elétrica por tipo de consumo em 2013. [Retirado da base de dados Pordata].	2
Figura 2.1 - Representação do conceito de casa inteligente com uma diversidade de componentes integrados [4].....	6
Figura 2.2 - Representação de alguns dos diferentes componentes que integram a habitação doméstica referente ao trabalho de dissertação: autoconsumo fotovoltaico, veículo elétrico e bomba de calor.	8
Figura 2.3 - Representação dos fluxos de energia relativo ao funcionamento de um sistema de autoconsumo [9].	9
Figura 2.4 - Representação do perfil de cargas (A+C) e do perfil de produção (B+C) mostrando possíveis estratégias para aproveitar o excesso de produção (B) [10].....	12
Figura 2.5 - Nissan Leaf 2014, carro elétrico mais vendido nos Estados Unidos e na Europa em 2014 segundo a Carplace (14 658 unidades).	14
Figura 2.6 - Representação dos consumos finais de energia na União Europeia em 2013 nos diferentes sectores [Retirado da base de dados pordata].	16
Figura 2.7 - Demonstração do princípio de funcionamento associado ao uso da bomba de calor [24].	18
Figura 2.8 - Representação de uma instalação aerotérmica (água-ar) referente a uma solução da Warak [25].....	19
Figura 2.9 - Representação de uma instalação geotérmica (terra-água) de circuito fechado com captação horizontal referente a uma solução da Warak [25].	20
Figura 2.10 - Representação da constituição de uma bateria [31].	22
Figura 2.11 - Representação de um sistema autónomo [32].	24
Figura 2.12 - Desenvolvimento exponencial do desempenho de algumas tecnologias de baterias [33].	26
Figura 2.13 - Representação dos preços da eletricidade para consumidores domésticos em alguns países da União Europeia [Retirado da base de dados Pordata].	30
Figura 2.14 - Representação do conceito de Eficiência Energética [48].	31

Figura 2.15 - Representação dos diferentes recursos de controlo implementados numa habitação doméstica [52].	34
Figura 2.16 - Aplicação de uma AMI numa HAN através do uso de smart meter [57].	35
Figura 2.17 - Representação dos componentes fundamentais de um sistema HEM [56].	37
Figura 2.18 - Representação das empresas implícitas no mercado dos HEMS, ordenadas de acordo com o nível de automação e de inteligência [65].	42
Figura 2.19 - Representação da aplicação de um sistema HEM.	43
Figura 2.20 - Ilustração da aplicação do método de soluções não dominadas para a minimização de um problema de otimização com objetivo múltiplo [72].	46
Figura 2.21 - Algoritmo referente ao processo iterativo formulado no AIMMS para encontrar o máximo nível de satisfação necessário para minimizar os pagamentos de eletricidade abaixo do desejado nível [64].	48
Figura 3.1 - Esquema relativo aos diferentes compartimentos da habitação doméstica referente ao trabalho de dissertação.	52
Figura 3.2 - Valores reais relativos aos consumos das cargas não controláveis.	57
Figura 3.3 - Valores preditivos dos consumos das cargas não controláveis.	57
Figura 3.4 - Valores reais relativos à produção fotovoltaica.	60
Figura 3.5 - Valores preditivos relativos à produção fotovoltaica.	61
Figura 3.6 - Representação da interseção dos dados reais relativos aos consumos das cargas não controláveis com os dados reais relativos à produção fotovoltaica.	62
Figura 3.7 - Evolução do estado de carga da bateria durante a operação de carregamento.	64
Figura 3.8 - Evolução do estado de carga do sistema de armazenamento por baterias durante a operação de carregamento.	67
Figura 3.9 - Característica do COP no modo de Aquecimento.	68
Figura 3.10 - Característica do COP no modo de Arrefecimento.	69
Figura 3.11 - Valores reais relativos à temperatura exterior.	69
Figura 3.12 - Valores preditivos relativos à temperatura exterior.	70
Figura 3.13 - Característica da Potência Aquecimento.	70
Figura 3.14 - Característica da Potência de Arrefecimento.	71
Figura 4.1 - Fluxograma referente ao funcionamento do sistema de otimização.	77
Figura 4.2 - Fluxograma referente ao controlo das horas de carga e descarga relativas ao Veículo Elétrico.	78
Figura 4.3 - Fluxograma referente à decisão das horas de carga e descarga do sistema de armazenamento por baterias.	79
Figura 4.4 - Fluxograma referente ao funcionamento da bomba de calor.	80

Figura 4.5 - Fluxograma referente ao funcionamento das cargas controláveis.....	82
Figura 4.6 - Fluxograma referente ao funcionamento do Veículo Elétrico.	83
Figura 4.7 - Fluxograma referente ao funcionamentos do sistema de armazenamento por baterias.	84
Figura 5.1 - Interface do simulador de otimização desenvolvido através da linguagem de programação VisualBasic.....	89
Figura 5.2 - Interface do simulador de otimização referente à definição dos dados do consumidor para a máquina de lavar roupa.	89
Figura 5.3 - Operações de carga referentes à operação de funcionamento do Veículo Elétrico para o cenário 1.	92
Figura 5.4 - Operações de descarga referentes à operação de funcionamento do Veículo Elétrico para o cenário 1.	93
Figura 5.5 - Evolução do estado de carga da bateria associada ao Veículo Elétrico para o cenário 1.....	94
Figura 5.6 - Operações de carga referentes à operação de funcionamento do Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 1.	94
Figura 5.7 - Operações de descarga referentes à operação de funcionamento do Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 1.	95
Figura 5.8 -Evolução do estado de carga associada ao Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 1.	95
Figura 5.9 - Evolução do custo total de operação do sistema ao longo do periodo de simulação para o cenário 1.....	96
Figura 5.10 - Operações de carga referentes à operação de funcionamento do Veículo Elétrico para o cenário 2.	98
Figura 5.11 - Operações de descarga referentes à operação de funcionamento do Veículo Elétrico para o cenário 2.	99
Figura 5.12 - Evolução do estado de carga da bateria associada ao Veículo Elétrico para o cenário 2.....	99
Figura 5.13 - Operações de carga referentes à operação de funcionamento do Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 2.	100
Figura 5.14 - Operações de descarga referentes à operação de funcionamento do Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 2.	101
Figura 5.15 - Evolução do estado de carga associada ao Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 2.	101
Figura 5.16 - Evolução do custo total de operação do sistema ao longo do periodo de simulação para o cenário 2.....	102
Figura 5.17 - Evolução do estado de carga da bateria associada ao Veículo Elétrico para os cenários 3, 4 e 5.....	104

Figura 5.18 - Operações de carga referentes à operação de funcionamento do Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 3.	106
Figura 5.19 - Operações de descarga referentes à operação de funcionamento do Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 3.	106
Figura 5.20 - Evolução do estado de carga associada ao Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 3.	107
Figura 5.21 - Evolução do custo total de operação do sistema ao longo do periodo de simulação para o cenário 3.	107
Figura 5.22 - Operações de carga referentes à operação de funcionamento do Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 4.	108
Figura 5.23 - Operações de descarga referentes à operação de funcionamento do Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 4.	109
Figura 5.24 - Evolução do estado de carga associada ao Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 4.	109
Figura 5.25 - Evolução do custo total de operação do sistema ao longo do periodo de simulação para o cenário 4.	110
Figura 5.26 - Operações de carga referentes à operação de funcionamento do Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 5.	111
Figura 5.27 - Operações de descarga referentes à operação de funcionamento do Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 5.	111
Figura 5.28 - Evolução do estado de carga associada ao Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 5.	112
Figura 5.29 - Evolução do custo total de operação do sistema ao longo do periodo de simulação para o cenário 5.	112

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Descrição de algumas das diferentes tecnologias de baterias e respetivas aplicações e características.	25
Tabela 2.2 - Componentes possíveis de implementar nas diferentes abordagens dos HEMs. ...	35
Tabela 2.3 - Sumário de várias descrições relativas a técnicas matemáticas de otimização de sistemas.	48
Tabela 3.1 - Períodos horário aplicados ao longo do período de simulação.....	53
Tabela 3.2 - Meses correspondentes aos diferentes Períodos.	54
Tabela 3.3 - Valores das tarifas aplicadas a cada período horário.	54
Tabela 3.4 - Dados relativos às cargas controláveis.	56
Tabela 3.5 - Dados relativos às cargas não controláveis.....	57
Tabela 3.6 - Esquemas de controlo do funcionamento das cargas controláveis.	58
Tabela 3.7 - Dados relativos aos intervalos de funcionamento das cargas controláveis definidos pelo utilizador.	60
Tabela 3.8 - Dados relativos ao funcionamento do Veículo Elétrico.	63
Tabela 3.9 - Capacidades associadas a determinadas necessidades de trajeto.	64
Tabela 3.10 - Dados relativos às necessidades de trajeto e de intervalo de utilização definidas pelo utilizador	64
Tabela 3.11 - Dados relativos ao funcionamento do sistema de armazenamento por baterias.	66
Tabela 3.12 - Dados relativos ao funcionamento da Bomba de Calor.	68
Tabela 3.13 - Dados relativos às necessidades definidas pelo utilizador.	73
Tabela 4.1 - Resumo das características dos diferentes cenários implementados.	86
Tabela 5.1 - Resultados referentes ao consumo das cargas não controláveis.	90

Tabela 5.2 - Resultados obtidos referentes à operação de funcionamento da bomba de calor para os cenários 1 e 2.	90
Tabela 5.3 - Resultados obtidos referentes à operação de funcionamento das cargas controláveis referentes ao cenário 1.	91
Tabela 5.4 - Resultados obtidos referentes às horas de funcionamento das diferentes cargas controláveis ao longo do período de simulação referentes ao cenário 1.	91
Tabela 5.5 - Resultados obtidos referentes à operação de funcionamento do Veículo Elétrico referentes ao cenário 1.	92
Tabela 5.6 - Resultados obtidos referentes à operação de funcionamento das cargas controláveis referentes ao cenário 2.	96
Tabela 5.7 - Resultados obtidos referentes às horas de funcionamento das diferentes cargas controláveis ao longo do período de simulação referentes ao cenário 2.	97
Tabela 5.8 - Resultados obtidos referentes à operação de funcionamento do Veículo Elétrico referentes ao cenário 2.	97
Tabela 5.9 - Resultados obtidos referentes à operação de funcionamento da bomba de calor para os cenários 3, 4 e 5.	102
Tabela 5.10 - Horários admitidos para as horas de funcionamento das diferentes cargas controláveis ao longo do período de simulação referentes aos cenários 3, 4 e 5.	103
Tabela 5.11 - Resultados obtidos referentes à operação de funcionamento das cargas controláveis referentes aos cenários 3, 4 e 5.	103
Tabela 5.12 - Resultados obtidos referentes à operação de funcionamento do Veículo Elétrico referentes aos cenários 3, 4 e 5.	104
Tabela 5.13 - Comparação dos resultados finais obtidos para os diferentes cenários.	113

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

ADR	<i>Automated Demand Response</i>
AMI	<i>Advanced Metering Infrastructure</i>
AOA	<i>Outer Approximation Algorithm</i>
AQS	Águas Quentes Sanitárias
BS-EMS	<i>Battery Strategy Energy Management System</i>
BTN	Baixa Tensão Normal
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CFL	<i>Compact Fluorescent Lamp</i>
COP	<i>Coefficient of Performance</i>
CO ₂	Dióxido de Carbono
CPP	<i>Critical Peak Pricing</i>
CPSO	<i>Co-Evolutionary Particle Swarm Optimization</i>
CTR	<i>Critical Time Rebates</i>
DERs	<i>Distributed Energy Resources</i>
DR	<i>Demand Response</i>
DSM	<i>Demand Side Management</i>
D2P	<i>Distributed Dynamic Pricing</i>
EES	<i>Electrical Energy Storage</i>
EHPA	<i>European Heat Pump Association</i>
EMS	<i>Energy Management System</i>
EPIA	<i>European Photovoltaic Industry Association</i>
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos

GA	<i>Genetic Algorithm</i>
GT	<i>Game Theory</i>
GTM	<i>GreenTechMedia</i>
HAN	<i>Home Area Network</i>
HEM	<i>Home Energy Management</i>
IA	Imposto Automóvel
ICT	<i>Information and Communications Technology</i>
ID	Índice de Desempenho
IHD	<i>In-Home Display</i>
IP	Índice de Performance
IUC	Imposto Único de Circulação
kWh	Kilowatt-hora
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MILP	<i>Mixed-Integer Linear Programming</i>
MIP	<i>Mixed-Integer Programming</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MO-MINLP	<i>Multiobjective Mixed-Integer Nonlinear Programming</i>
PBI	Programas baseados em Incentivos
PBP	Programas baseado em Preços
PCC	Ponto Comum de Acoplamento
PCS	<i>Power Conversion System</i>
PNL	Programação Não Linear
REN	Redes Energéticas Nacionais
RESP	Rede Elétrica de Serviço Público
RTP	<i>Real Time Pricing</i>
SOC	<i>State of Charge</i>
TOU	<i>Time-of-Use</i>
UGS	Uso Global do Sistema
UPAC	Unidade de Produção para Autoconsumo

VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>
VCI	Veículo de Combustão Interna
VE	Veículo Elétrico
VEH	Veículo Elétrico Híbrido
VEHP	Veículo Elétrico Híbrido Plug-in
V2G	<i>Vehicle-to-Grid</i>
ZE	Zero Emissões
ZEBRA	<i>Zero Emission Battery Reserach</i>

Lista de símbolos

€	Euro
°C	Graus Celsius
Δ	Delta

Capítulo 1

Introdução

O presente documento foi desenvolvido no âmbito da unidade curricular Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. O tema abordado é “Otimização de operação de um sistema energético de habitação doméstica, com autoprodução fotovoltaica, veículo elétrico e bomba de calor”, e o proponente do tema é o Professor Doutor Cláudio Monteiro.

O primeiro capítulo desta dissertação pretende enquadrar o leitor no tema a desenvolver, apresentando a motivação principal para este trabalho, a contextualização em que o mesmo se insere, os objetivos que são pretendidos alcançar com a sua elaboração, assim como a descrição da estrutura principal desta dissertação. Por fim são descritas as ferramentas computacionais utilizados no desenvolvimento deste trabalho de dissertação.

1.1 Motivação

Nos dias de hoje verifica-se na maioria das habitações domésticas a existência de uma enorme diversidade de equipamentos que, com o desenvolvimento da tecnologia, são cada vez mais eficientes. Contudo, uma má gestão dos consumos relativos ao setor doméstico faz-se também sentir cada vez mais e é responsável por custos elevados e indesejados associados à fatura da eletricidade.

Uma boa gestão dos consumos referentes ao setor doméstico mostra-se cada vez mais como um fator determinante para que o crescimento de tecnologia seja implementado nas diversas habitações domésticas e permitam assim que os consumidores possam usufruir com plena satisfação de todos os benefícios inerentes a estes.

Desta forma, os sistemas de otimização preditiva mostram-se com um papel importante ao permitir realizar esta boa gestão dos consumos através do agendamento das diversas operações referentes aos equipamentos presentes ao nível da habitação doméstica e,

consequentemente, permitir reduzir os custos de eletricidade sem reduzir o nível de satisfação dos consumidores.

É neste contexto que se insere a motivação deste trabalho de dissertação no qual é pretendido desenvolver um sistema de otimização preditiva para a operação de um sistema energético de habitação doméstica que para além das cargas típicas associadas à mesma contém autoprodução fotovoltaica, veículo elétrico e bomba de calor. Para além destes foi ainda incluído um sistema de armazenamento por baterias que permitirá o armazenamento local de energia.

1.2 Contextualização

As preocupações relativamente ao aumento do consumo de eletricidade, a dependência dos combustíveis fósseis e o seu impacto negativo no ambiente e a volatilidade dos preços da eletricidade, têm desencadeado a promoção de atividades de eficiência energética e mudanças nos sistemas elétricos.

A posse de equipamentos domésticos é cada vez maior com o desenvolvimento da tecnologia, sendo esta uma situação que tende a aumentar. Aliando essa realidade a maus comportamentos e hábitos dos consumidores que estão ainda longe de se sensibilizarem com as questões de eficiência energética, temos duas das principais causas dos elevados consumos no setor doméstico. Como é possível observar na figura 1.1, o setor doméstico em 2013 foi o segundo setor com maiores consumos de energia elétrica.

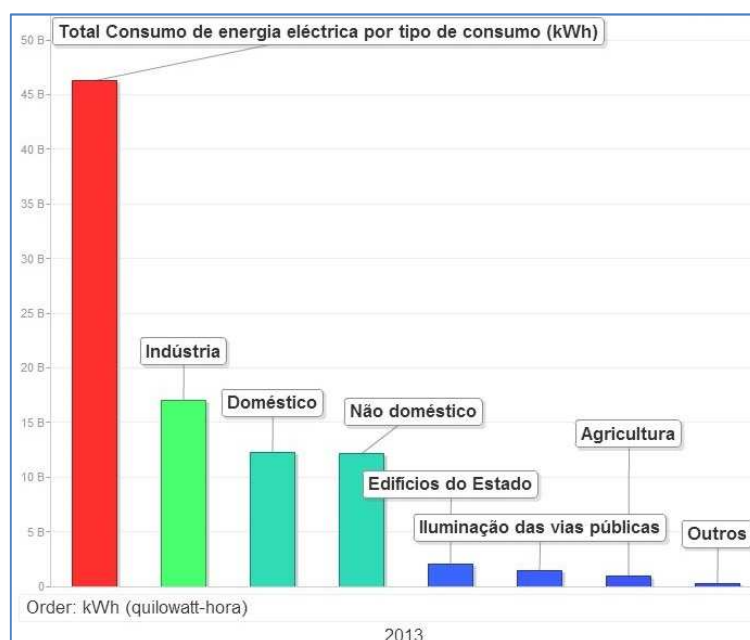


Figura 1.1 - Representação dos consumos de energia eléctrica por tipo de consumo em 2013. [Retirado da base de dados Pordata].

Desta forma, os elevados consumos verificados são assim responsáveis por custos também elevados e indesejados. A implementação de tecnologias limpas e eficientes ao nível deste sector, mostra-se como uma solução que o consumidor deve adotar de forma a minimizar os desperdícios de energia e diminuir assim estes custos. Por outro lado, no contexto das *smart-grids*, responsáveis por modernizar a rede elétrica, o aparecimento de uma infraestrutura de medição avançada que permite a medição de informação detalhada baseada no tempo, assim como uma recolha frequente e transmissão de dados para os destinos desejados, aliado à existência de cargas inteligentes inseridos no contexto da domótica e a uma rede doméstica denominada de *Home Area Network*, permitem dispôr ao alcance do consumidor um vasto leque de informação bastante útil e que pode ser utilizada para diversas operações, tais como a sua participação no sistema de otimização através de programas de *Demand Response*.

Contudo, toda essa informação e tecnologia precisa de ser interligada de forma a procurar uma solução ótima a aplicar aos consumos relativos à sua habitação doméstica. Neste sentido, surge assim a necessidade de implementação de um sistema de tecnologia de gestão energética no setor doméstico que, através de uma coordenação dos vários recursos de gestão dos consumos conduzirá à otimização desejada relativa ao uso da eletricidade permitindo maiores eficiências operacionais, assim como uma maior integração de renováveis.

1.3 Objetivos

Os objetivos procurados com o desenvolvimento deste trabalho de dissertação são, de uma forma simplificada, os seguintes:

- Desenvolvimento de um sistema de otimização preditiva de operação para uma casa inteligente que permita obter reduções no custo associado à faturação relativa ao seu sistema energético.
- Combinar as vertentes de consumo de energia elétrica convencional, com consumo de energia nos transportes, consumo de energia para aquecimento e arrefecimento e armazenamento local de energia elétrica.
- Compreender e avaliar o impacto dos diversos componentes presentes ao nível do sistema energético de habitação doméstica no sistema de otimização.
- Procurar maximizar o aproveitamento da produção fotovoltaica como forma de energia limpa presente ao nível do sistema energético da habitação doméstica.
- Compreender o impacto de informação preditiva no sistema de otimização preditiva.

1.4 Descrição do documento

O presente documento de dissertação encontra-se dividido em seis capítulos.

No capítulo 1 é feita uma introdução onde é apresentada a motivação e contextualização deste trabalho de dissertação, os objetivos pretendidos com a sua realização e a indicação das diversas ferramentas computacionais utilizados no seu desenvolvimento.

No capítulo 2 é apresentado o estudo do estado da arte onde são abordadas as informações essenciais e descritivas relativas às diferentes tecnologias presentes ao nível do sistema energético de habitação doméstico, assim como as técnicas adotadas para o desenvolvimento de algoritmos relacionados com o *Home Energy Management*. Este capítulo é baseado em informações recolhidas de outros estudos realizados e relacionados de alguma forma a este tema.

No capítulo 3 é realizada a modelização que rege o funcionamento das diferentes tecnologias que compõem o sistema energético de habitação doméstica relativa ao trabalho de dissertação. As características dos mesmos foram baseadas em dados de modelos reais existentes no mercado.

No capítulo 4 é descrito o algoritmo adotado e implementado no desenvolvimento do sistema de otimização.

No capítulo 5 são apresentados e analisados todos os resultados obtidos.

Por fim no capítulo 6 são descritas as conclusões retiradas com o desenvolvimento deste trabalho de dissertação.

1.5 Ferramentas Computacionais Utilizadas

Na realização e desenvolvimento deste trabalho de dissertação foram utilizadas como ferramentas computacionais o Microsoft Office Excel, no qual foram realizadas as diversas operações de cálculos necessárias, realização e edição de gráficos e análise de dados. Foi também utilizado o Visual Basic for Applications (sigla VBA) que é uma linguagem de programação baseada no Visual Basic e que permite automatizar tarefas no Microsoft Office Excel, tendo sido a partir desta implementado o algoritmo de otimização. Ao longo do desenvolvimento do sistema de otimização foi utilizado também o software *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*, o qual se mostrou bastante interessante para este tipo de otimizações matemáticas. Contudo, devido a limitações da versão do software disponível e na impossibilidade de adquirir versões completas, não foi possível otimizar o sistema energético de habitação doméstica pretendido através deste. Foi também utilizada a ferramenta computacional Microsoft Office Word na escrita do documento em questão.

Capítulo 2

Estudo do Estado da Arte

O presente capítulo baseia-se no estudo de literatura existente sobre autoconsumo fotovoltaico, veículo elétrico, bomba de calor, sistemas de armazenamento por baterias, assim como sobre gestão de eficiência energética e algoritmos de otimização energética associados ao setor doméstico. Foram analisadas diferentes fontes bibliográficas que são referenciadas ao longo do capítulo e identificadas no final do documento.

2.1 Introdução

A casa inteligente é um sistema de controlo com um completo conjunto de comunicações, equipamentos automatizados, segurança e outras funções baseadas em equipamento avançado e um modo de gestão científico, usando uma variedade de redes de comunicação, automação combinada e tecnologia de comunicação. O propósito da casa inteligente é permitir um ambiente de conforto e segurança, eficiência energética e economia de custos. É necessário resolver a situação corrente de escassez de energia e do aquecimento global, ambas suscitadas pelo modelo de desenvolvimento de elevada energia. No esforço de reduzir o desperdício de energia e as emissões de dióxido de carbono, a gestão de energia das casas inteligentes é a chave, sendo também parte integrada das *Smart-Grids* [1].

Os sistemas de energia tradicionais estão apenas previstos para realizar a operação em recursos de geração presentes na rede elétrica de serviço público (sigla RESP) porque a maioria das cargas do sistema de energia não são nem controláveis nem mensuráveis na resolução de tempo necessária. No entanto, como resultado do aparecimento e utilização de medidores inteligentes, sensores e dispositivos de controlo automático inteligente que são implantados ao nível da casa inteligente, o sistema de gestão de energia da casa inteligente funciona como uma gestão integrada de informações de eletricidade e energia ao nível doméstico incluindo geração distribuída como a energia fotovoltaica e a energia eólica [1].

A energia associada a uma casa inteligente pode ser gerida através da seleção de equipamentos eficientes, de uma melhoria no conhecimento e na experiência dos consumidores relativas à gestão de energia residencial, da participação em programas de *Demand Response* (sigla DR), bem como através do desenvolvimento de um *Energy Management System* (sigla EMS). Emissões ambientais podem ser diminuídas através da diminuição da dependência de combustíveis fósseis, da adoção de fontes de geração de energia renovável, assim como através do controlo do consumo de eletricidade [2].

Assim, os principais objectivos da casa inteligente passam por aumentar a automação residencial através de melhores comunicações, facilitar a gestão de energia através da seleção de aparelhos eficientes e do melhoramento da consciência do consumidor, e reduzir as emissões ambientais [3].

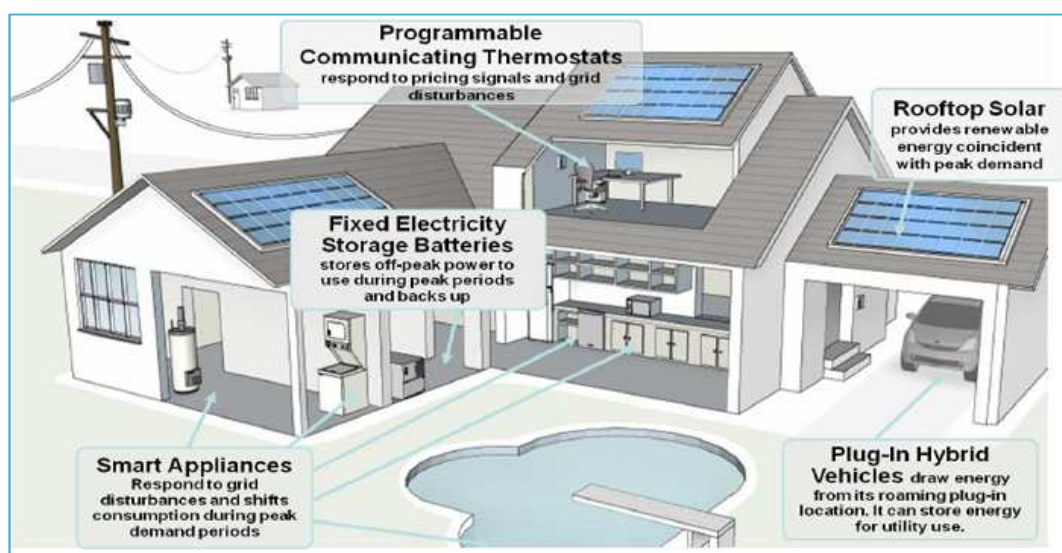


Figura 2.1 - Representação do conceito de casa inteligente com uma diversidade de componentes integrados [4].

A forma como todos os nossos dispositivos e aparelhos estão ligados em rede para nos fornecer um controlo absoluto sobre todos os aspectos da nossa habitação é denominado de domótica. A domótica tem estado presente na nossa sociedade ao longo de muitas décadas em termos de iluminação e controlo de aparelhos simples. Contudo, só recentemente é que se verificou uma evolução da tecnologia que contribuiu para a introdução da ideia de um mundo interligado e, permitiu assim, que o controlo total da nossa habitação a partir de qualquer lugar se tornasse uma realidade. Com a domótica, é possível decidir como um dispositivo deve reagir, quando deve reagir, e porque é que ele deve reagir. O consumidor define o agendamento das atividades e o restante é automatizado e baseado de acordo com as suas preferências pessoais, proporcionando assim comodidade, controlo e economia monetária [5].

Ao longo das últimas décadas, muitas empresas têm entrado no setor da domótica, contribuindo para isto a grande expansão que se verifica atualmente neste setor. Recentemente, a Honda [6] apresentou a sua *Net Zero Energy Smart Home* no campus da Universidade da Califórnia, a qual é esperado que em média produza mais energia a partir de fontes locais renováveis do que aquela que recebe da RESP. O projeto é descrito como “um sistema *Home Energy Management* (sigla HEM) com o objetivo de alcançar a eficiência energética, que irá permitir aos habitantes utilizar menos de metade da energia de uma casa de tamanho semelhante na mesma área para aquecimento, arrefecimento e iluminação”. Para além de um sistema fotovoltaico, o qual produz energia suficiente para alimentar não só a habitação mas também o *Honda Fit Electric Vehicle*, o edifício é gerido também por um sistema HEM da Honda que monitoriza e controla as cargas da habitação, o *Fit Electric Vehicle*, que foi modificado para receber energia diretamente através do sistema fotovoltaico e assim eliminar as perdas de energia durante a conversão, e o sistema de armazenamento de energia. Para solucionar os problemas associados aos elevados consumos de energia referentes ao aquecimento e arrefecimento, o edifício possui uma bomba de calor que recupera o calor da terra e das águas residuais da casa, enquanto um sistema de aquecimento e refrigeração radiante foi instalado nos pisos e nos tetos do edifício, tendo estes mais potencial para serem eficientes do que os sistemas convencionais.

Esta interconectividade de dispositivos é então o elemento que torna possível o desempenho das ações de controlo independentes tomadas pelo consumidor e, que permite assim alcançar os benefícios inerentes ao conceito de casa inteligente. Neste sentido, alguns dispositivos desempenham um papel muito importante ao permitirem melhorar os níveis de desempenho pretendidos, mostrando-se assim com um grande potencial para possibilitar a que sejam atingidas as metas que contribuem para melhorar as condições do nosso ambiente. Exemplos desses dispositivos são os painéis solares fotovoltaicos associados ao conceito de autoconsumo, o veículo elétrico, a bomba de calor e sistemas de armazenamento, os quais farão parte integral da habitação doméstica relativa ao trabalho de dissertação onde se pretende otimizar a eficiência energética operacional.



Figura 2.2 - Representação de alguns dos diferentes componentes que integram a habitação doméstica referente ao trabalho de dissertação: autoconsumo fotovoltaico, veículo elétrico e bomba de calor.

2.2 Autoconsumo fotovoltaico

As preocupações com os preços da eletricidade, com o meio ambiente e com a eficiência energética são cada vez maiores. Na verdade, os custos elevados dos combustíveis fósseis, as preocupações com as reduções de emissões de poluentes e a dependência energética, são razões que levam ao investimento em energias renováveis. Assim, a utilização dessas energias limpas provenientes de fontes renováveis é uma aposta cada vez maior e, apesar da sua natureza intermitente, representam uma grande parcela do mix energético.

O autoconsumo, atividade regulada pelo Decreto-Lei nº 153/2014 de 20 de Outubro e pelas portarias nº 14/2015 e 15/2015 de 23 de janeiro, é um novo modelo de produção descentralizada de energia a partir de fontes renováveis em que a energia elétrica produzida é consumida pelo produtor sempre que possível de forma a colmatar as suas necessidades de consumo (energia autoconsumida), existindo a possibilidade de armazenar localmente ou injetar na RESP o remanescente, que corresponde à energia injetada líquida [7]. Segundo [8], esta legislação proporciona ao consumidor a possibilidade de produzir a sua própria energia, facultando finalmente o direito de investimento numa alternativa à energia da RESP, e facilitando a utilização do seu próprio recurso energético.

A figura 2.3 demonstra o conceito inerente ao autoconsumo. A energia autoproduzida é representada pelas setas a verde, enquanto que a energia proveniente da RESP é representada pelas setas a preto e representa a energia líquida consumida. Esta energia é utilizada quando o autoconsumo não é suficiente para satisfazer os consumos, ou como estratégia para a gestão de eficiência energética como será visto mais à frente. Para medir a quantidade de energia consumida ou injetada na RESP, dois contadores são necessários. Um contador mede a energia gerada pelo sistema fotovoltaico. Já o segundo contador funciona bidirecionalmente medindo a energia obtida a partir da RESP e a energia injetada para a mesma.

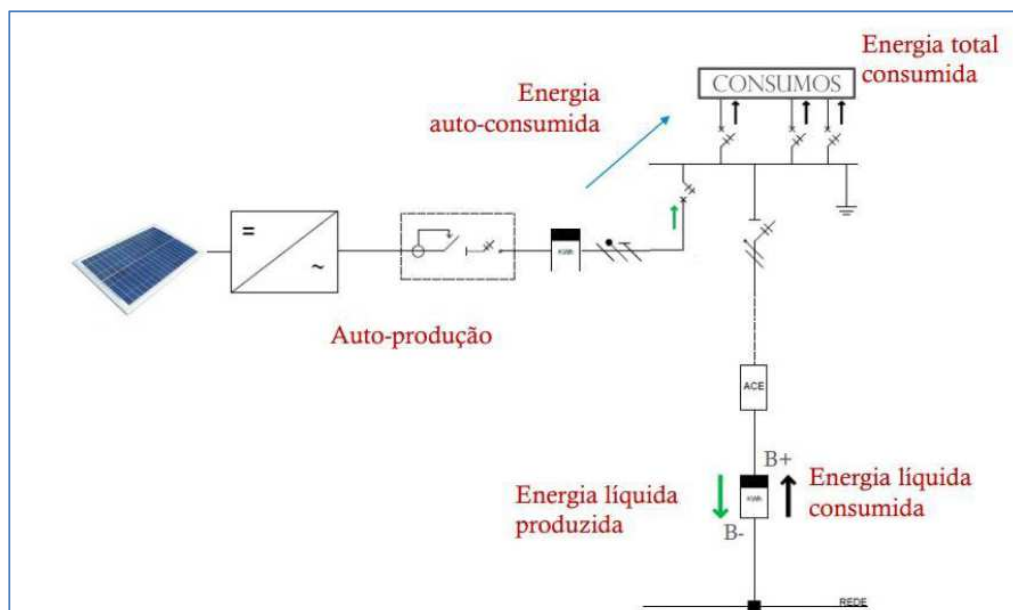


Figura 2.3 - Representação dos fluxos de energia relativo ao funcionamento de um sistema de autoconsumo [9].

Relativamente aos modelos anteriores de microgeração e minigeração, o autoconsumo distingue-se por permitir o consumo da própria energia autoproduzida, por relaxar limites de capacidade e cotas dando flexibilidade para que o mercado funcione naturalmente, salientando-se ainda o importante aspecto de não ter qualquer encargo adicional para o sistema elétrico, ao contrário de todos os mecanismos de promoção de renováveis implementados anteriormente [8]. Ao contrário das restantes tecnologias que requeriam políticas de suporte tais como tarifas e subsídios que compensassem a falha entre os custos de produção e a receita de utilização e assim permitissem promover a energia fotovoltaica no sistema de energia, o custo do autoconsumo segundo [10], é hoje em dia inferior ao preço de retalho da eletricidade em alguns países, o que o torna rentável sem subsídios, competindo assim como uma fonte de energia.

Segundo [7], o autoconsumo fotovoltaico é uma das formas mais interessantes de redução dos consumos de eletricidade da RESP e de poupança mensal na fatura elétrica. Com a introdução do autoconsumo foi possível conseguir-se uma maior eficiência quando a Unidade de Produção para Autoconsumo (sigla UPAC) é dimensionada de acordo com as necessidades da instalação de consumo. Caso haja excedentes, a energia excedente (energia injetada líquida) é paga pelo produtor da RESP a preços de mercado, mediante contrato assinado com esta entidade. Cabe assim ao produtor escolher se quer ou não injetar na RESP a energia não consumida. O excedente de produção para além do valor total anual de consumo não é remunerado.

Segundo a *European Photovoltaic Industry Association* (sigla EPIA), o autoconsumo tem surgido em alguns países como a Dinamarca, como uma substituição ao conceito de *Net Metering*, que consiste na capacidade do consumidor de armazenar energia elétrica

produzida na sua instalação de produção local em períodos de excesso da mesma, e que é utilizada posteriormente de forma a compensar a procura do consumidor, sendo fornecida durante períodos de cobrança aplicável. Se for usado com uma extensão temporal anual, este conceito pode permitir que a produção excedente nos meses de verão possa ser usada nos meses de inverno ou vice-versa, conforme o clima do país considerado. Por outro lado, o autoconsumo é também visto segundo a mesma fonte como um potencial que poderá conduzir ao desenvolvimento dos sistemas fotovoltaicos [11].

O autoconsumo fotovoltaico, tecnologia presente ao nível do sistema energética de habitação doméstica referente ao trabalho de dissertação, consiste na instalação de painéis fotovoltaicos que captam a radiação solar e que, com a ajuda de inversores de corrente, produzem energia elétrica que é consumida na própria instalação. O impacto da energia solar nos sistemas renováveis tem sido notável. De acordo com o autor [10], nos últimos anos a capacidade fotovoltaica instalada tem crescido rapidamente, sendo que em 2013 foram instalados mais de 37 GW por todo o mundo. Mas se por um lado estes números oferecem inúmeras vantagens ao consumidor, por outro lado a injeção crescente de energia na RESP leva à necessidade de reforço da mesma e portanto a uma necessidade de realizar custos extras de investimento. A introdução do autoconsumo é assim uma opção para lidar com estes investimentos que serão fortemente reduzidos.

Existem já várias soluções de implementação do autoconsumo. Entre elas estão presentes o autoconsumo sem acumulação (injeção direta) e o autoconsumo com acumulação. No primeiro caso verifica-se a injeção direta da energia no circuito elétrico do local, permitindo uma redução total ou parcial do consumo diurno, sem recurso a baterias de carga. Nesta solução, o dimensionamento do campo fotovoltaico depende do consumo diurno. Na solução com acumulação existe a possibilidade de recorrer ao armazenamento local de energia fotovoltaica através de baterias. Este armazenamento pode ser efetuado no caso de se verificar um excesso de produção face aos consumos estimados para esse instante ou até mesmo com o objetivo de otimizar as faturas dos consumos energéticas. Neste sentido há assim a possibilidade de armazenar a energia produzida em horas em que se verifique menores preços de eletricidade, e sua posterior administração em horas em que os preços da eletricidade são superiores, tal como será implementado na simulação de otimização do trabalho de dissertação.

Ao nível do mercado, o autoconsumo apresenta-se para as empresas deste sector como uma grande oportunidade para um novo mercado emergente. Segundo [8], ficam, desta forma, abertas novas oportunidades de mercado para o sector e para novas empresas com novos modelos de negócio, criando postos de trabalho e impulsionando a economia verde. Este modelo de autoconsumo implicará novas abordagens do mercado, integrando conceitos de autoprodução com conceitos de eficiência energética e também novas formas de

comercialização de energia e serviços. O autoconsumo será assim importante para atingir metas da diretiva de eficiência energética.

Segundo [12], o autoconsumo fotovoltaico surge assim trazendo inúmeras vantagens tais como:

1. Promoção da produção de energia renovável num ponto próximo ao consumo e portanto reduz as perdas.
2. Incentiva a produção de energia renovável, ou seja, democratiza a produção de eletricidade e permite a entrada no mercado de novos atores o que faz com que aumente a concorrência e baixem os preços. Além disso, acaba com o monopólio de algumas empresas produtoras de energia elétrica.
3. Dinamiza a indústria solar fotovoltaica, oferecendo um crescente protagonismo a empresas portuguesas durante toda a cadeia de valor.
4. Promove a criação de emprego e contribui para a formação e o desenvolvimento dos recursos locais.

O autoconsumo surge numa altura em que para além de se verificar um impacto crescente das energias renováveis, verifica-se também a adoção de sistemas de eficiência energética que permitem gerir toda esta tecnologia emergente de forma a satisfazer tanto as necessidades dos consumidores como também as necessidades dos operadores da rede de distribuição. Desta forma podemos constatar um forte sentimento de necessidade de, através de várias estratégias, procurar maximizar a utilização do autoconsumo que, se por um lado irá permitir uma melhor correspondência entre o consumo e a produção intermitente de renováveis, diminuindo a procura de energia proveniente da RESP, por outro lado contribuirá para um melhor funcionamento da rede de distribuição prevenindo por exemplo sobretensões.

De acordo com várias literaturas [10,13], o armazenamento de energia e a gestão de cargas associada ao conceito de *Demand Side Management* (sigla DSM) apresentam-se como duas potenciais tecnologias que permitem otimizar a utilização do autoconsumo. A figura 2.4 foi retirada de [10] onde é realizado um estudo relativo à capacidade da utilização das estratégias citadas anteriormente na tentativa de melhorar o aproveitamento do autoconsumo.

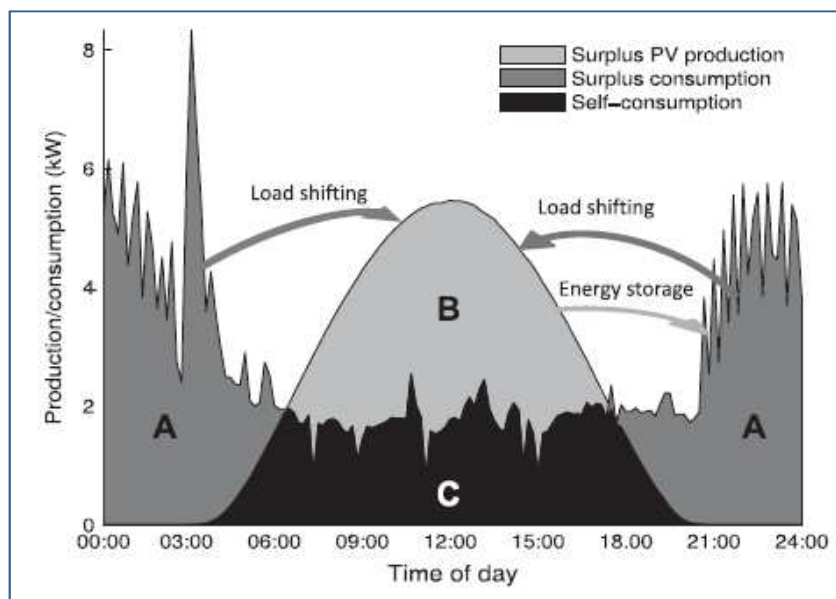


Figura 2.4 - Representação do perfil de cargas (A+C) e do perfil de produção (B+C) mostrando possíveis estratégias para aproveitar o excesso de produção (B) [10].

É possível verificar o impacto que tais estratégias podem ter no aproveitamento do autoconsumo referente à área B+C, donde apenas a área C corresponde à energia autoconsumida para alimentação das cargas. Com o aproveitamento da área B para satisfação do consumo é possível reduzir a energia injetada líquida, sendo este o principal objetivo do autoconsumo. Consequentemente é possível reduzir a fatura de energia elétrica otimizando os consumos, o qual é por sua vez o principal objetivo deste trabalho de dissertação.

Em [10] são sumarizados vários artigos de estudo referentes a esta tentativa de melhorar o aproveitamento do autoconsumo, tendo sido mostrado um potencial aumento do mesmo em todos através das estratégias referidas anteriormente. Contudo os resultados variaram significativamente. A explicação proposta foi o facto da maioria dos estudos serem baseados em casos particulares e portanto, fatores de influência como o clima, as características da casa, os tipos de cargas e os tamanhos dos sistemas fotovoltaicos, diferirem bastante nos diferentes estudos. Por outro lado um problema importante referenciado quanto ao uso do veículo elétrico como tecnologia para aumentar o autoconsumo é a alta incompatibilidade entre o carregamento do veículo que maioritariamente é concentrada ao final da tarde, noite e madrugada e a produção fotovoltaica que normalmente é maior durante o meio-dia [10].

Assim, conforme está montado em Portugal, o objetivo do autoconsumo é consumir o máximo de energia local produzida possível uma vez que a energia injetada líquida é mais cara que a produção líquida, ou seja, não compensa vender à RESP. Com todos os benefícios e aplicações inerentes, o autoconsumo é assim uma ótima solução para procurar alcançar as metas propostas pela União Europeia em 2020 permitindo entre outras aumentar a produção proveniente de fontes renováveis [14].

2.3 Veículo Elétrico

As preocupações relativamente à elevada dependência dos combustíveis fósseis, que se por um lado apresentam um impacto negativo no meio ambiente, por outro apresentam uma enorme volatilidade de preços, têm desencadeado a promoção de atividades de eficiência energética e mudanças nos sistemas elétricos, principalmente ao nível do setor dos transportes, sendo este um dos maiores consumidores de combustíveis fósseis.

Segundo [15], os veículos elétricos (sigla VEs) apresentam-se como uma solução sustentável para a mitigação destas problemáticas apresentando vantagens face aos veículos a combustão interna (sigla VCI), nomeadamente ao nível da eficiência, do consumo energético, dos níveis de emissões de gases poluentes e dos custos associados à operação dos mesmos.

Entende-se por VE uma viatura que utiliza propulsão por meio de motores elétricos. Os VE fazem parte do grupo dos veículos denominados Zero Emissões (sigla ZE), ou seja, zero ruídos, zero emissões de gases de efeito de estufa e zero emissões de poluentes. Contudo, dependendo da forma como é produzida a eletricidade, esta poderá representar mais ou menos emissões poluentes nos locais de produção. Neste sentido a utilização de fontes renováveis mostra mais uma vez o importante papel que representa para o futuro da sociedade.

Outra grande vantagem da utilização dos VEs, é o facto de estes atualmente beneficiarem da isenção de Imposto Automóvel (sigla IA) e Imposto Único de Circulação (sigla IUC). Os governos de Portugal e de muitos outros países estão também a oferecer subsídios para conseguirem uma maior penetração no mercado destes veículos. No entanto, face ao seu elevado preço de venda inicial, e às principais limitações das baterias ao nível de preço, peso e dimensão, autonomia, tempo de carregamento e desgaste associado, a desconfiança gerada juntos dos consumidores não tem fomentado o crescimento destas novas tecnologias automóveis.

Atualmente, existem diversos tipos de VEs, que embora utilizem todos motores elétricos possuem diferentes características que merecem distinção. Entre eles destacam-se os seguintes:

- Veículo puramente elétrico - tipo de veículo que depende unicamente de energia elétrica, sendo o carregamento das suas baterias efetuado através da energia proveniente da RESP. Permite um reaproveitamento da energia despendida durante a travagem.
- Veículo elétrico híbrido (sigla VEH) - tipo de veículo que conjuga a utilização de motores elétricos com a utilização de motores de combustão interna a gasolina, gasóleo, etc. Neste tipo de veículo a bateria é carregada pelo motor de combustão interna. Apesar de apresentarem emissões nocivas para o ambiente,

esta emissão é reduzida pois possuem regimes de funcionamento em que somente utilizam o motor elétrico.

- Veículo elétrico híbrido plug-in (sigla VEHP) - tipo de veículo que se distingue do anterior por possuir um modo de funcionamento com recurso exclusivo ao motor elétrico. O motor de combustão interna, em caso de o sistema de gestão de energia detetar uma necessidade de recarregar as baterias de armazenamento, é ativado e atua recarregando as mesmas, estendendo a sua autonomia.

Ao nível do mercado, o balanço das vantagens e desvantagens inerentes à utilização do VE, mostra-se positivo, sendo este considerado uma alternativa promissora para o sector dos transportes do futuro, segundo [16]. É expectável que a evolução tecnológica inerente ao decorrer dos anos, especialmente no investimento em postos de abastecimento e baterias de armazenamento mais eficientes, juntamente com a tendência crescente do agravamento do preço dos combustíveis fósseis, potenciem a penetração destas tecnologias no mercado automóvel. Por outro lado é necessária uma sensibilização crescente dos consumidores relativamente a esta tecnologia que permita a mitigação do sentimento de preocupação partilhado de ficarem sem energia antes de atingirem o seu destino[16].



Figura 2.5 - Nissan Leaf 2014, carro elétrico mais vendido nos Estados Unidos e na Europa em 2014 segundo a Carplace (14 658 unidades).

O VE quando associado a uma habitação doméstica, como é neste trabalho de dissertação, pode apresentar dois diferentes tipos de funcionamento: como uma simples carga, controlável e condicionada, a qual contribui para o aumento dos consumos da habitação em que está integrado, ou então associada a um sistema *Vehicle-to-Grid* (sigla V2G). Aquando do seu funcionamento como uma simples carga, há que ter em atenção que uma má gestão de

carregamento pode levar a picos de consumo indesejáveis, uma vez que o carregamento do VE pode corresponder a um consumo tipicamente igual à totalidade dos consumos da habitação doméstica. Como é possível ver na figura 2.6, o sector dos transportes é o setor com maiores consumos finais de energia na União Europeia e, apesar da parcela associada ao consumo de energia elétrica não ser considerável na parcela total, o aumento do uso do VE como uma simples carga irá contribuir para o aumento desta.

Desta forma é necessária a introdução de estratégias de controlo dos consumos elétricos no sector dos transportes de forma a evitar o aumento do consumo indesejado associado a estes como simples cargas.

Segundo [17], V2G descreve um sistema no qual os VEHP e/ou os VE, comunicam com fornecedores de energia para participar em programas DR ao permitir que a eletricidade flua de novo para a RESP. Um outro autor [18], considera o sistema V2G como uma aplicação chave das *Smart-Grids*.

Assim surge a capacidade de uso do VE como armazenamento de energia para posterior distribuição e alimentação de cargas, potenciando os consumos. Ao nível do sector doméstico esta solução apresenta-se com uma enorme importância ao nível da eficiência energética operacional. Para além de tornar possível obter poupanças significativas na conta de eletricidade dos consumidores, permite também uma redução de sobrecargas dos sistemas durante horas de ponta ao melhorar o balanço de cargas, podendo ser utilizada de forma a baixar a procura durante esse período. Contudo, há que referir o facto deste processo de ciclos repetidos de carregamento e descarregamento introduzir perdas no sistema, para além de uma grande degradação da bateria do VE. Apesar destes inconvenientes segundo [17], esta tecnologia tem um impacto significativo de negócio com bastante potencial em várias áreas do serviço público, incluindo a gestão dos *commodities* e as operações de rede (problemas com a intermitência das fontes renováveis).

Neste trabalho de dissertação, a utilização do VE será associada a um sistema V2G e o seu carregamento é assumido como a realizar-se exclusivamente na habitação doméstica. Desta forma, o VE apresenta várias condicionantes de funcionamento como por exemplo o carregamento e descarregamento, limitados por um valor máximo associado à capacidade da bateria, e o intervalo de tempo que o VE está fora da habitação doméstica, o qual limita a sua utilização e dessa forma, também a quantidade de energia do VE condiciona o problema a que está associado, podendo ser assumido como uma variável que toma dois valores distintos, um quando está associada ao intervalo de tempo em que está presente na habitação, e o outro quando o VE está fora da mesma.

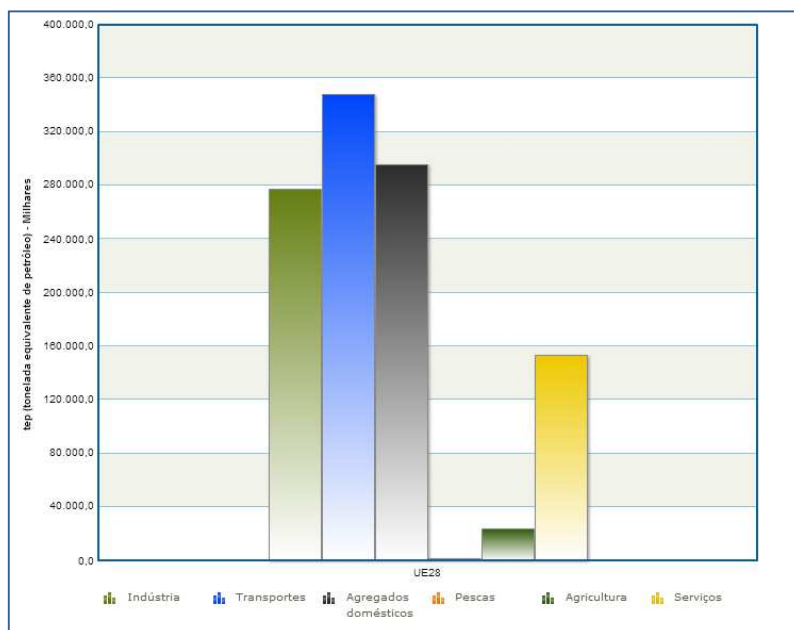


Figura 2.6 - Representação dos consumos finais de energia na União Europeia em 2013 nos diferentes sectores [Retirado da base de dados pordata].

O carregamento do VE requer então que seja necessário adoptar estratégias de carregamento otimizado para que o desejado controlo possa ser implementado com resultados positivos como é desejado. Na verdade vários fatores afetam o comportamento do carregamento do VE, tais como tipo de conexão utilizada (unidirecional ou bidirecional), número de veículos a carregar numa dada área, duração do carregamento e o perfil da bateria e a sua capacidade [19].

Existem vários estudos que propõem diferentes mecanismos na procura de um carregamento do VE otimizado. Em [20] é apresentado um mecanismo inteligente de *Distributed Dynamic Pricing* (sigla D2P) para carregamento de VEHP numa arquitetura de *Smart-Grid*. Segundo o autor, a integração dos VEHP nas *Smart-Grids* requer uma política de carregamento inteligente para que o perfil de consumo de energia destes seja otimizado, em ordem a ser possível obter uma gestão de energia confiável, eficiente e com boa relação custo-benefício. Em [21] o autor define para além da estratégia de controlo inteligente V2G, uma outra estratégia relacionada com o conceito de carregamento inteligente que permite suavizar os picos de consumo adicionais, assim como os custos e emissões no sector dos transportes ao permitir o uso mais eficiente de tecnologias de produção, explorando as renováveis sempre que possível. Segundo o autor, estas estratégias de controlo aplicadas aos VE podem ser o elemento chave para ligar as necessidades de transporte e as necessidades de produção a partir de fontes renováveis. O autor apresenta então um estudo em que pretende investigar o carregamento do VE na sua habitação doméstica, no sentido de modificar a coincidência entre o perfil de produção fotovoltaica e o perfil de cargas da habitação com a inclusão das estratégias de controlo já citadas. Nesta literatura são ainda apresentadas outras

formulações de simulação das implicações dos VE e de diferentes estratégias de controlo inteligente no sistema elétrico.

O impacto do carro elétrico na realização dos objetivos da União Europeia para 2020 relativas às alterações climáticas e energia [14] é visível e diferentes estratégias têm de ser promovidas. Segundo [22], as empresas vão começar a poder comprar carros eléctricos com apoios dos fundos comunitários, para substituir veículos da sua frota. Este é apenas um dos tipos de operações que poderão beneficiar de apoios comunitários no âmbito da promoção da eficiência energética e da utilização das energias renováveis nas empresas. Os benefícios dos VE terão definitivamente muita atenção dos seus proprietários e dos operadores da rede de distribuição num futuro próximo.

2.4 Bomba de Calor

Na sociedade moderna em que vivemos verifica-se, principalmente ao nível das habitações domésticas, um crescente consumo na procura do aquecimento do ar e na obtenção de águas quentes sanitárias, que proporcionam aos consumidores maiores comodidades ambientais. Estas necessidades levam para além de uma procura pela diminuição dos custos referentes aos serviços mencionados, à busca de tecnologias que respondam à existente exigência dos requisitos de eficiência que é cada vez maior.

As bombas de calor apresentam-se como uma excelente alternativa às formas tradicionais de aquecimento como as caldeiras e permitem responder de forma positiva às necessidades dos consumidores. Segundo [23], a substituição de uma caldeira a gás ou gasóleo por uma bomba de calor permite a redução da fatura energética até 70%.

As bombas de calor são dispositivos que operam realizando um ciclo termodinâmico cujo objetivo é transferir calor de uma fonte fria para uma fonte quente, ou vice-versa. Mais concretamente, as bombas de calor aproveitam a energia térmica proveniente do ar circundante, do subsolo ou até mesmo de lençóis de água subterrânea fornecendo-a à habitação para os diferentes fins, ou seja, realizam a transferência de energia térmica em vez de gerar energia diretamente. É aqui que reside a grande vantagem inerente ao uso da bomba de calor, uma vez que ao aproveitar este calor remanescente das diferentes superfícies citadas, reduz enormemente a quantidade de eletricidade necessária para produzir energia térmica. Este fator permite que grande parte da eletricidade consumida por uma bomba de calor possa ser produzida por painéis solares fotovoltaicos, tornando a habitação numa propriedade praticamente de “energia zero”.

Este facto, se por um lado contribui enormemente para a maximização do aproveitamento do autoconsumo e, conseqüentemente uma redução da fatura da eletricidade, por um outro permite reduzir também as emissões de CO₂. Assim, segundo [23], pelas amplas vantagens ambientais e económicas, a política energética da União Europeia para os próximos anos promove não só a utilização das energias renováveis, mas em

particular a bomba de calor. Há que referir algumas vantagens inerentes à bomba de calor como a sua longevidade e manutenção reduzida, a sua sustentabilidade (grande economia de médio e longo prazo), a independência dos combustíveis fósseis e a versatilidade de soluções [25].

Dentro de uma bomba de calor circula um fluido refrigerante. Este está na fase líquida ou gasosa consoante a sua temperatura e pressão a que está sujeito. Ao contrário do que estamos habituados a ver com a água, este fluido consegue entrar em ebulição a uma temperatura muito baixa e condensar a uma temperatura elevada [26].

O funcionamento da bomba de calor é então, um ciclo contínuo do fluido refrigerante pelos diferentes componentes (compressor, condensador, válvula de expansão e evaporador) onde ocorrem os seguintes processos, ilustrados na figura 2.7 [26]:

- Evaporação: A fonte de calor ao entrar no evaporador arrefece o fluido de transporte e este evapora.
- Compressão: O vapor entra no compressor e é comprimido, aumentando a pressão e a temperatura
- Condensação: O vapor sobreaquecido entra no condensador onde é condensado a altas temperaturas para a fonte emissora.
- Expansão: O líquido a alta pressão entra na válvula de expansão, reduzindo a pressão ao ponto inicial.

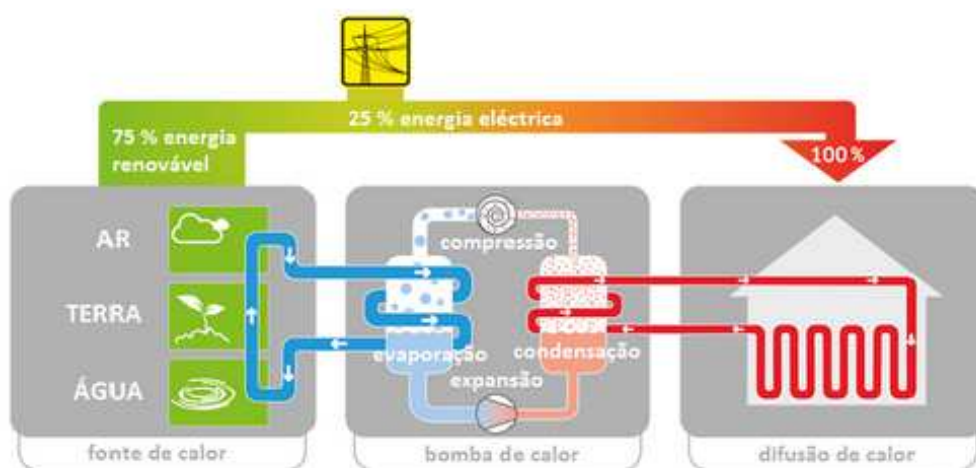


Figura 2.7 - Demonstração do princípio de funcionamento associado ao uso da bomba de calor [24].

No caso das bombas de calor para águas quentes sanitárias (sigla, AQS) como é o caso da bomba de calor presente no sistema energético de habitação doméstica relativa ao trabalho

de dissertação, a condensação é feita num depósito de água, que recebe o calor cedido pelo fluido ao condensar. Dependendo do fluido utilizado, a água no interior do depósito poderá atingir temperaturas de 55°C a 60°C [26].

A eficiência deste ciclo é denominada de *coefficient of performance* (sigla COP) e consiste no quociente entre a quantidade de energia térmica produzida pela bomba de calor e a quantidade de energia eléctrica necessária para realizar o trabalho aplicado pelo compressor, tal como se apresenta na equação (2.1).

$$COP = \frac{\Delta Q}{W} \quad (2.1)$$

As bombas de calor, segundo [25], podem dividir-se em duas classes de acordo com o seu tipo de instalação:

1. Instalação Aerotérmica: as bombas de calor aerotérmicas têm como fonte de calor o ar e podem dividir-se em duas categorias de acordo com as suas características: bombas de calor de temperaturas normais (até 55 °C) e as bombas de calor de alta temperatura (65 °C). Dependendo dos requisitos específicos do projeto (sobretudo de espaço), as bombas de calor aerotérmicas apresentam diferentes figurinos de equipamento na relação e funcionalidades entre as unidades exteriores e interiores. Em regra, as bombas de calor aerotérmicas são mais fáceis de instalar e normalmente requerem menos espaço, apresentando menores custos globais de instalação.

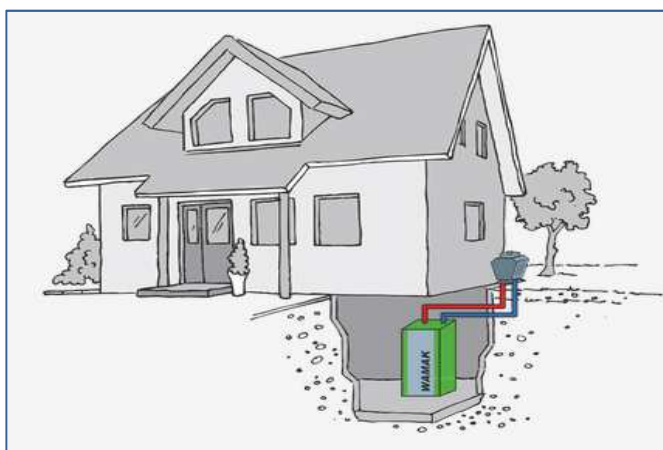


Figura 2.8 - Representação de uma instalação aerotérmica (água-ar) referente a uma solução da Warak [25].

2. Instalação Geotérmica: as bombas de calor geotérmicas apresentam-se em três categorias principais segundo as temperaturas que alcançam: 55°C, 65°C, 75 °C e podem funcionar a partir de dois tipos de fonte de calor: a terra/solo e a água. O tipo de instalação

destas bombas pode ser efetuado de três formas distintas, de acordo com a fonte selecionada:

- Horizontal (plataforma horizontal soterrada a baixa profundidade com tubos de captação em circuito fechado).
- Vertical (perfuração do subsolo com inserção vertical das sondas geotérmicas em circuito fechado).
- Lençol freático (aproveitamento das águas subterrâneas em circuito aberto).

Relativamente à sua posição no mercado, segundo a *European Heat Pump Association* (sigla EHPA), “a venda de bombas de calor na Europa aumentou 3% em 2013, tendo sido vendidas 769 879 unidades em 21 países”. Relativamente a Portugal, os dados mostram uma variação positiva próxima dos 20%, isto após uma queda superior a 35% em 2012, tendo o mesmo se verificado em outros países da Europa como a Suécia e a Espanha. Segundo a EHPA, “a tendência de crescimento positivo para a adoção de bombas de calor deve-se a uma maior exigência dos requisitos de eficiência energética para os edifícios, que fazem das bombas de calor as soluções preferidas nos casos em que é necessário um novo sistema de aquecimento, apontando contudo o elevado investimento inicial, os períodos de decisão de curto prazo e o custo elevado da eletricidade como fatores que continuam a limitar o crescimento do mercado”.

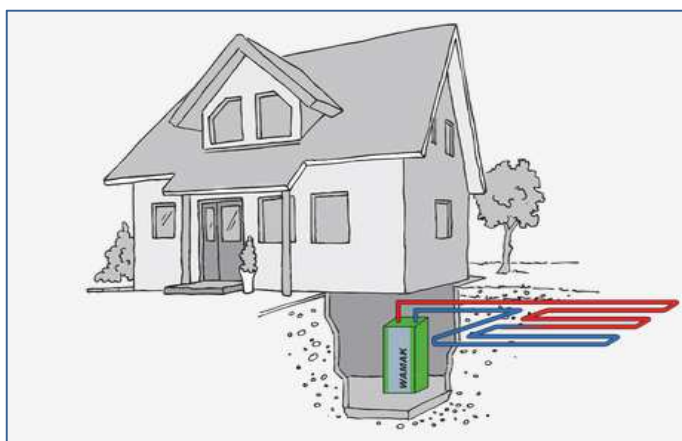


Figura 2.9 - Representação de uma instalação geotérmica (terra-água) de circuito fechado com captação horizontal referente a uma solução da Warak [25].

Segundo a mesma fonte, o mercado da bomba de calor continua a reger-se por três grandes tendências:

1. O ar é e continuará a ser a fonte de energia dominante para as bombas de calor.

2. As bombas de calor para águas quentes sanitárias são o segmento de mercado com crescimento mais rápido em toda a Europa. Esta categoria é a única que mostra o crescimento de dois dígitos.
3. As bombas de calor de larga-escala para aplicações de aquecimento comerciais, industriais e/ou em redes de aquecimento urbano são cada vez mais populares.

Contudo, há que não esquecer que, em áreas com grande penetração de bombas de calor, no inverno, a procura de energia será maior quando todas trabalharem simultaneamente. De facto, segundo [27], a maior percentagem referente à utilização final de energia numa habitação doméstica é relativa ao aquecimento do espaço (65%) e devido ao aquecimento de águas sanitárias (15%). Este efeito, aliado à capacidade limitada da rede de distribuição, pode levar a problemas principalmente relativos aos limites de tensão (problemas de sobretensão), o que provoca a diminuição da procura do uso de renováveis [27]. Assim, como uma carga de segundo nível, as bombas de calor podem ser desligadas por exemplo quando ligamos o forno elétrico que por si próprio já possui um consumo considerável (aproximadamente 4kW) não sendo viável manter o aquecimento ligado e, por isso, deve-se desligar para dar prioridade a consumos necessários.

Os desafios de eficiência energética dos sistemas térmicos são uma excelente oportunidade para o crescimento destes equipamentos de superior prestação. Desta forma é de realçar o grande potencial que, por serem consideradas energia renovável, as bombas de calor apresentam para ajudar a Europa a alcançar as metas 2020, permitindo reduzir as emissões de CO₂ e, conseqüentemente, limitar os efeitos do aquecimento global. No entanto, é fundamental a sua integração em sistemas térmicos estruturados e dimensionados para otimizar as prestações globais, sendo o piso radiante a melhor das alternativas para maximizar a sua eficiência e conseqüente redução do consumo de energia [24].

2.5 Sistemas de Armazenamento - Tecnologia de Baterias

Nos países industrializados, como é o caso de Portugal, quase todas as pessoas dependem de certa forma diariamente do armazenamento de energia. Basta pensarmos num computador ou num telemóvel que se tornaram cada vez mais essenciais para a vida de muitas pessoas. Por outro lado, o consumo, a produção, e os custos de energia aumentam cada vez mais. Neste contexto, os *Electrical Energy Storage* (sigla EES), segundo [28], desempenham três papéis principais no mundo atual:

1. Reduzem os custos associados à fatura da eletricidade ao armazenar energia obtida em alturas fora do pico de consumos (tarifas de menor preço), permitindo

a sua utilização em alturas de pico, evitando a compra de energia a preços mais elevados (sujeitos a políticas de preços horários).

2. De forma a melhorar a confiabilidade do fornecimento de energia, suportam os consumidores quando ocorrem falhas na RESP devido a, por exemplo, desastres naturais.
3. Mantêm e melhoram a qualidade da energia, da frequência e da tensão.

Existem atualmente duas principais necessidades de mercado emergentes para os sistemas de EES como tecnologia chave. A primeira é a utilização de mais renováveis e portanto, a diminuição do uso de combustíveis fósseis. A segunda é relativa à futura estrutura das *Smart-grids* [28]. Na realidade, o cenário atual está a mudar, e há cada vez mais fontes de produção de energia cuja potência de saída não pode ser controlada, variando de acordo com a disponibilidade de recursos [29]. Entre toda a diversidade de tecnologias relativas aos sistemas de EES, neste trabalho de dissertação será utilizada a tecnologia de baterias no sentido de armazenamento de energia local, particularmente as baterias secundárias, ou seja, recarregáveis.

As baterias, tecnologia de armazenamento de energia eletroquímica, são a forma mais antiga de armazenamento de energia. São constituídas por uma ou mais células eletroquímicas, sendo que cada célula consiste num líquido, pasta ou eletrólito sólido juntamente com um elétrodo positivo (ânodo) e um elétrodo negativo (cátodo). Durante o descarregamento, reações eletroquímicas ocorrem nos dois elétrodos criando um trânsito de eletrões através de um circuito externo. O processo é reversível permitindo que a bateria carregue através da aplicação de uma tensão externa através dos elétrodos [30]. A desejada tensão da bateria, assim como os níveis de corrente são obtidos através da ligação elétrica das células em série e paralelo [29].

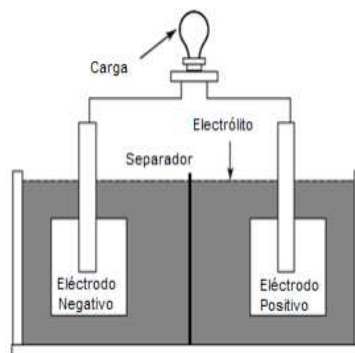


Figura 2.10 - Representação da constituição de uma bateria [31].

Algumas das características importantes de uma bateria que se devem ter em consideração aquando do seu dimensionamento são [31]:

- Capacidade da Bateria: quantidade de energia que uma bateria pode fornecer quando descarregada de forma uniforme ao longo de um dado período de tempo. Caso a bateria seja descarregada com uma corrente mais elevada, a sua capacidade é consideravelmente reduzida. Diminui com a idade e o uso.
- Profundidade de Descarga: indica a percentagem da capacidade nominal que é usada antes de se proceder ao recarregamento da bateria. Quanto mais profunda for a descarga, menor será o número de ciclos que a bateria irá durar.
- Tempo de Vida Útil: é definido em termos de número de ciclos de carga/descarga. Considera-se que uma bateria atingiu o final de vida útil quando a capacidade é reduzida a 80% da capacidade nominal. Em geral, depende das condições em que funciona a bateria, variando com a corrente de descarga, a temperatura de funcionamento ou a profundidade de descarga.
- Auto Descarga: é resultante de correntes internas na bateria, as quais levam a perda de carga mesmo que a bateria não seja utilizada.
- Densidade de Energia: é definida como a quantidade de energia armazenada por unidade de volume ou peso.

A tecnologia de baterias é, de certa forma, ideal para aplicações de armazenamento de energia eléctrica. Elas fornecem não só flexibilidade de combustível e benefícios ambientais, mas também um conjunto de benefícios operacionais para a RESP. As baterias podem responder muito rapidamente a mudanças de carga e aceitar potência de produção local e/ou de terceiros, aumentando assim a estabilidade dos sistemas. Normalmente, possuem perdas de *standby* muito pequenas e podem ter uma elevada eficiência energética (60-95%) [30].

Os avanços na tecnologia da bateria ao longo dos últimos 20 anos têm sido impulsionados principalmente pelo uso de baterias nas ferramentas de eletrónica de potência do consumidor. A nível do setor doméstico existem duas aplicações principais das baterias: sistemas autónomos e sistemas com ligação à RESP. Os sistemas autónomos, ou seja, sistemas de produção e de consumo de energia eléctrica sem ligação à RESP, são a solução ideal para locais em que, por razões diversas, não é possível a ligação à RESP, ou para sistemas instalados em autocaravanas ou barcos. Deste modo, toda a energia consumida é produzida localmente e de forma ecológica [32].

Um sistema autônomo é constituído por um ou mais geradores de energia, que são tipicamente painéis fotovoltaicos que captam a energia do sol, ou sistemas híbridos com aerogerador, os quais se têm mostrado mais eficientes e equilibrados. Através de um regulador de carregamento a energia eléctrica é carregada para as baterias, onde é armazenada até ser necessária. Para poder ser consumida, a eletricidade é retirada da bateria e convertida de corrente contínua (sigla CC) para corrente alternada (sigla CA) através do inversor de corrente. Deste modo é possível o uso de electrodomésticos convencionais, de forma análoga à energia eléctrica proveniente da RESP [32].

Somente nos últimos 20 anos, através de esforços para projetar melhores baterias para o transporte, é que se tornou possível o aparecimento desta tecnologia com ligação há RESP, sendo esta implementação adotada neste trabalho de dissertação. Para a tecnologia da bateria ser aplicada diretamente à RESP de CA, são necessários *reliable power conversion systems* (sigla PCS) que convertem a energia da bateria CC em energia CA. Esses dispositivos existem já hoje em dia e têm muitos anos de experiência de serviço, o que faz com que uma grande variedade de baterias sejam práticas para aplicações de suporte à RESP em aplicações como *peak shaving* e *valley filing* [33].

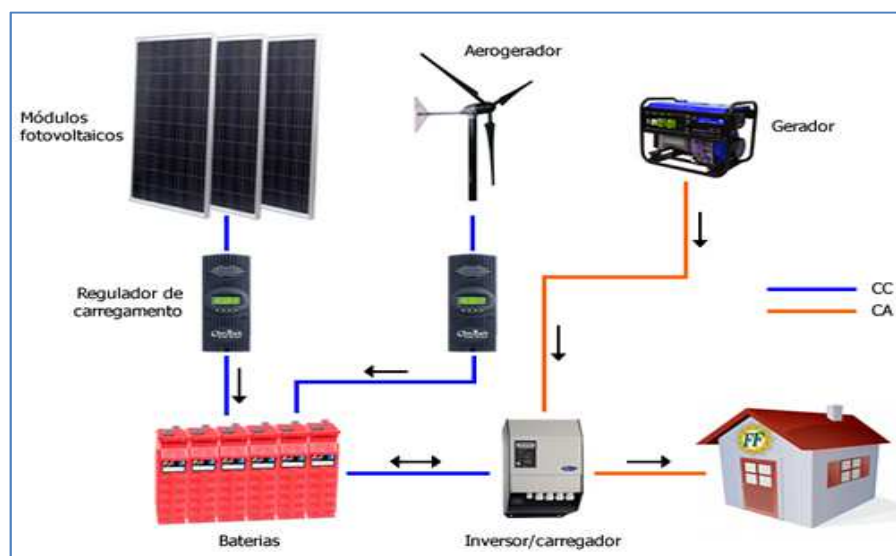


Figura 2.11 - Representação de um sistema autónomo [32].

Um sistema autónomo deve ser instalado apenas na situação em que existe a total impossibilidade da ligação à RESP. Comparado com os sistemas ligados à RESP, para produzir a energia equivalente ao consumo total anual, a potência a instalar é aproximadamente duas a três vezes superior. Em suma, os custos de um sistema autónomo são no mínimo duas vezes superiores aos custos dum sistema ligado à RESP [32].

Contudo, a utilização a grande escala das baterias como sistema de armazenamento tem sido rara até muito recentemente, devido à baixa densidade de energia, à pequena capacidade de energia, aos altos custos de manutenção, aos ciclos de vida útil curtos e à

capacidade de descarga limitada. Além disso, a maioria das baterias contém materiais tóxicos, levando a que o impacto ecológico da eliminação não controlada de baterias deve ser controlado [30].

Atualmente estamos a assistir a um desenvolvimento significativo na tecnologia de baterias. Diferentes tipos de baterias estão a ser desenvolvidos, dos quais alguns estão disponíveis no mercado, enquanto outros estão ainda em fase experimental [29]. Na tabela 1 são apresentadas algumas das diferentes tecnologias de baterias consideradas potencialmente adequadas para a utilização em aplicações de armazenamento de energia para suporte à RESP, sendo que para cada uma são descritas aplicações associadas assim como também algumas características.

Legenda: (+) - Vantagem; (-) - Desvantagem

Tabela 2.1 - Descrição de algumas das diferentes tecnologias de baterias e respetivas aplicações e características.

Tecnologias	Aplicações	Caraterísticas
<i>Lead Acid Battery</i>	Usadas tanto em aplicações móveis como fixas. A maioria das suas aplicações típicas é relativa ao sistema de energia. Estas são utilizadas em sistemas de alimentação de emergência, sistemas isolados com fotovoltaico e sistemas de baterias para a mitigação das flutuações da energia eólica. São também bastante utilizadas no arranque de automóveis [28].	<ul style="list-style-type: none"> •(+) Auto-descarga baixa. •(+) Elevada disponibilidade, fiabilidade e durabilidade. •(+) Tecnologia madura e bem estudada com baixo custo. •(-) Peso e volume elevados. •(-) Baixa densidade de energia (30-50 Wh/kg).
<i>Nickel Cadmium Battery</i>	As baterias de <i>Nickel Cadmium</i> estão cada vez mais em desuso. Contudo, foram já aplicadas a uma diversidade de projetos de armazenamento de energia. Em 2010, foram utilizadas em sistemas de estabilização de energia eólica como parte de um projeto elaborado na ilha de Bonaire com o objetivo de tornar esta a primeira comunidade com 100% alimentada por fontes renováveis [34]. Devido à toxicidade do cádmio, atualmente são usadas apenas em aplicações estacionárias na Europa [28], tendo vindo a ser questionadas por razões ambientais.	<ul style="list-style-type: none"> •(+) Baterias maduras e populares, de custo reduzido e leves. •(+) Baixa susceptibilidade à variação de temperatura, sendo capazes de bons desempenhos mesmo a baixas temperaturas na gama [-40, -20]°C. •(-) Efeito de memória. •(-) Toxicidade.
<i>Sodium Sulphur Battery</i>	Foi desenvolvida originalmente em 1960 pela <i>Ford Motor Company</i> para uso nos primeiros carros elétricos, contudo mais tarde foi abandonada para esse uso, tendo a tecnologia sido vendida à companhia japonesa NGK [33]. O seu conjunto de atributos permite-lhes serem utilizadas economicamente em aplicações que combinam qualidade de energia e <i>time shift</i> com elevada densidade de energia. São apropriadas para aplicações de ciclo diário [28]. A procura destas baterias como um meio efetivo de estabilizar a potência de saída de sistemas de produção renovável e fornecimento de serviços auxiliares está a expandir [35].	<ul style="list-style-type: none"> •(+) Eficiência: 89%. •(+) Capaz de 6 horas de descarga diária. •(+) Sistema de bateria de elevada temperatura (aproximadamente 300°C). •(-) Necessidade de uma fonte de calor para manter a temperatura de operação.
<i>Lithium Ion Battery</i>	São segundo [33] a tecnologia de baterias mais recente e com mais ampla base de utilização. A partir de 2000 tornaram-se na tecnologia de armazenamento mais importante nas áreas de aplicações portáteis e móveis (telemóveis e computadores portáteis por exemplo), onde o volume, o peso e a autonomia são mais importantes que o tempo de vida útil. A implementação destas baterias em aplicações estacionárias tem aumentado significativamente desde 2010 e tem beneficiado da vasta experiência adquirida no desenvolvimento de baterias para VE e VEHP [36]. Estão ainda em desenvolvimento e existe um potencial considerável para mais desenvolvimento [29]. Há uma perspetiva de grande	<ul style="list-style-type: none"> •(+) Elevada eficiência: 95-98%. •(+) Flexibilidade de acondicionamento, sendo também leves em peso. •(+) Possuem picos de densidade de energia muito elevados. •(-) Elevados Custos.

redução de custo através de produção em massa.

Sodium nickel
chloride
battery
(ZEBRA)

Mais conhecidas como *Zero Emission Battery Research* (sigla ZEBRA), estão disponíveis comercialmente desde 1995. Sendo uma tecnologia relativamente nova, foram originalmente introduzido no mercado para VE e VEHP. Pesquisas recentes estão a desenvolver versões avançadas da bateria com maiores densidades de energia para os VEH e também versões de alta energia para armazenar energia renovável destinada a aplicações de nivelamento de carga e aplicações industriais [28]. Foram também utilizadas no sistema de submarino de resgate da NATO [30].

- (+) Eficiência Energética: 92%.
- (+) Capacidade de suportar sobrecargas e descargas limitadas.
- (+) Melhores características de segurança e uma tensão de célula maior que as baterias *Sodium Sulphur*.
- (-) Baixas densidades de energia e potência.

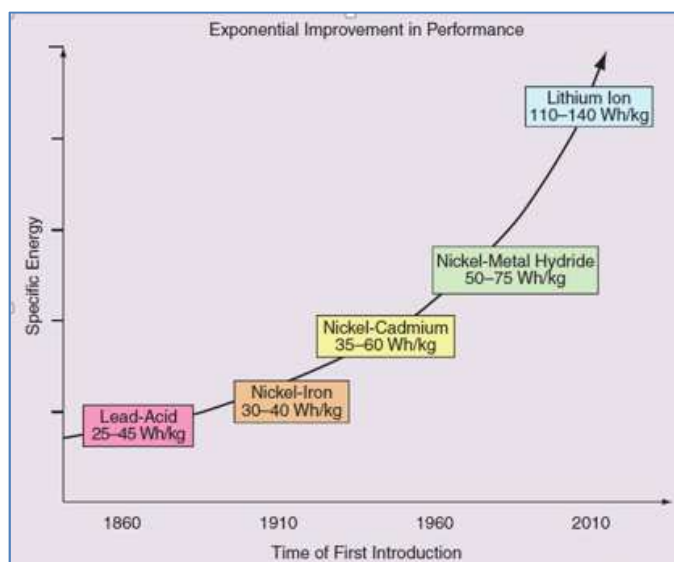


Figura 2.12 - Desenvolvimento exponencial do desempenho de algumas tecnologias de baterias [33].

Vários estudos têm sido aplicados a este tema. Em [37], é apresentada uma estratégia económica de gestão de energia baseada em tarifas *Time-Of-Use* (sigla TOU) para um sistema fotovoltaico ligado à RESP com sistema de armazenamento de bateria destinado a aumentar a eficiência de custo. Semelhantemente, em [38], é investigado um projeto referente a um algoritmo de carga/descarga ótima para sistemas distribuídos de armazenamento por baterias, conetados a sistemas fotovoltaicos que também considera análise de custo. Em [39], é explicado como é que baterias interligadas a sistemas distribuídos podem ser utilizadas para expandir a produção de energia de redes convencionais ligadas a geradores fotovoltaicos, a maioria segundo condições de operação *mismatching*. *Hector ei al.* propõe em [40] uma estratégia de gestão de energia para geradores de potência em grande escala, operando com diferentes características de armazenamento de energia. Em [41], é implementado um sistema fotovoltaico instalado num telhado, com um *Battery Strategy Energy Management System* (sigla BS-EMS), para satisfazer as cargas domésticas, regular a tensão no ponto comum de acoplamento (sigla PCC), e fornecer à RESP uma saída de potência constante durante o dia. É investigado o impacto da classificação da bateria no desempenho da BS-EMS, através da realização de simulações detalhadas através da ferramenta computacional PSCAD para situações de dias típicos de sol e nuvens no verão e no inverno.

Existem também pesquisas relativas a sistemas autônomos com armazenamento de baterias. Em [42], é investigado o desempenho e fornecimento de energia de diferentes tipos de tecnologias de baterias apropriadas ao uso em sistemas isolados.

Com o interesse crescente no armazenamento de energia para melhor uso dos transportes e das energias renováveis, atividades de pesquisa estão a aumentar na indústria privada, universidades e laboratórios nacionais. Grandes universidades incluindo o *Massachusetts Institute of Technology* (sigla MIT) estão a trabalhar no sentido de desenvolver novas tecnologias de armazenamento, procurando criar muitas baterias em grande escala capazes de armazenar quantidades enormes de energia na RESP [33]. Por outro lado, um estudo de mercado referente ao potencial dos sistemas de EES relativo às baterias de íões de lítio, foi realizada pelo grupo Panasonic (Sanyo), através de uma simulação, assumindo diversos pressupostos relativos a tendências dos preços de compra das baterias, à não escassez do recurso (lítio), etc. Os resultados indicaram que o mercado destas baterias irá continuar a crescer e, para o mercado residencial em particular, irá aumentar rapidamente a partir de 2017. Segundo [28], há e haverá uma grande variedade de aplicações de baterias de íões de lítio.

No contexto do trabalho de dissertação, a aplicação de baterias prende-se com o armazenamento local de energia de forma a permitir maximizar o autoconsumo, assim como também a desempenhar um papel relativo a estratégias de consumo, permitindo reduzir os custos do consumidor. Segundo [28], as tecnologias de bateria esperam-se que desempenhem um papel importante no conceito de casa inteligente uma vez que permitem:

1. Suprimir o pico de procura através do nivelamento de cargas. No entanto, as perdas relativas à operação de carga/descarga irão aumentar simultaneamente a quantidade de energia elétrica consumida. Os operadores podem ser capazes de reduzir os custos de energia elétrica por meio da otimização da operação dos sistemas EES.
2. Reduzir o desequilíbrio entre a procura de energia e a sua própria geração local.
3. Solucionar situações específicas, como a interrupção do fornecimento de energia em que a geração local de renovável tem problemas de operação isolada devido a ser uma fonte de energia intermitente.

Segundo [28], em casas inteligentes, os sistemas de armazenamento de baterias mais utilizados atualmente são as baterias de ácido chumbo devido ao seu baixo custo de investimento. Contudo, no futuro, espera-se que em particular as baterias de íões de lítio, que apesar de apresentarem maiores eficiências apresentam também maiores custos de

investimento, e as baterias ZEBRA, que apresentam a desvantagem de necessitarem de ciclos diários para evitar aquecimento adicional, possam ser também instaladas tirando-se proveito do seu elevado tempo de ciclo de vida e da sua capacidade para oferecer elevada potência de pico. Na verdade, segundo uma declaração feita pelo CEO da Tesla Elon Musk, “a mesma tecnologia de baterias de íões de lítio que alimentam os VEs da Tesla, está a ser estudada de forma a desenvolver-se como uma bateria para a habitação doméstica”. Pequenas baterias são já abundantes em muitos edifícios, mas elas são projetadas para alimentar telemóveis e outros *gadgets*. Contudo Musk tem algo mais ambicioso em mente: uma bateria adequada para as procura de energia provenientes da RESP. As baterias seriam usadas em habitações domésticas e empresas para armazenar o excesso de energia gerada a partir de painéis fotovoltaicos durante o dia, e utilizá-la durante a noite, quando os painéis ficam fora de serviço [43].

Desta forma, a empresa Tesla prevê enfrentar uma grande concorrência para as suas baterias, com nomes como Bosch, GE e Samsung envolvidos. Contudo, uma área em que Tesla considera que se pode destacar é no custo. A Tesla monta as suas baterias através de células de baterias fornecidas pela Panasonic, e está prestes a fazê-lo em grande escala, assim que em 2016, a sua grande fábrica atualmente em construção no Nevada estiver concluída. Essa economia de escala - produzir 50 GWh de capacidade de bateria a cada ano - é esperada que empurre os custos das baterias dos automóveis da empresa para baixo em 30%. Assim, com base na mesma tecnologia, os custos de baterias para uso doméstico da Tesla devem também vir para baixo. A Tesla pode então ser capaz de mudar a dinâmica do setor de energia, especialmente se as suas baterias poderem tornar o armazenamento de energia distribuída mais acessível, mais eficiente e relevante para além dos proprietários de VEs [43].

As baterias para a habitação doméstica têm assim o potencial de ser uma vantagem para os consumidores que utilizam a sua própria fonte de energia local, particularmente aqueles cujas habitações estão ligadas à RESP através de empresas de serviços públicos que oferecem tarifas variáveis dependentes da hora do dia, planos de tarifas TOU. Um consumidor de fotovoltaico, como é o caso do consumidor alvo deste trabalho de dissertação, normalmente tem de consumir energia através da RESP durante o período relativo ao final de tarde assim como durante à noite, quando o sol diminui, o que corresponde também ao período em que as taxas de energia são mais elevadas. Os sistemas de armazenamento de energia em casa permitem assim ajudar os proprietários a manter os custos baixos, utilizando a energia a partir da bateria em vez de comprar à RESP a um preço mais elevado, recarregando a bateria fora das horas de pico [43]. O benefício é a diferença de preço entre as horas de pico e as horas fora de pico, menos o custo das perdas de energia durante o ciclo de carga-descarga do armazenamento. Ao armazenar localmente a energia excedente, permite também reduzir o problema relativo ao aumento da tensão durante o pico de geração fotovoltaico ao injetar menos energia para a RESP ou alimentando as cargas domésticas locais que,

consequentemente, leva à redução do stress na RESP [41]. Reconhecer o valor do armazenamento ao lidar com a variabilidade de recursos renováveis é essencial para o aproveitamento do potencial máximo das energias renováveis [33].

2.6 Gestão da Eficiência Energética em habitações domésticas.

Como foi visto anteriormente através da figura 2.6, o setor doméstico, que é o setor alvo deste trabalho de dissertação, é o segundo setor com maiores consumos finais de energia na União Europeia, sendo também um dos setores onde se verifica elevados valores de consumo de eletricidade. Elevados consumos de energia elétrica, implicam elevados valores a pagar pela conta da eletricidade. Contudo, para tal, não contribui somente o elevado preço da eletricidade mas também a má eficiência energética que se verifica neste sector. Segundo [44], Portugal ocupa a 4ª posição relativamente a despesas em eletricidade no ranking da Europa para o que contribuem grandemente os elevados preços da eletricidade, que em Portugal se encontra acima da média europeia dos 28 países, e a má qualidade da construção das habitações por falta de preocupações de qualidade de construção que só a partir de 2006, após a saída de um regulamento a exigir isolamentos mais espessos e vidros duplos é que começaram a aparecer.

Por outro lado, atualmente o consumo de eletricidade é o factor que mais contribui para a emissão dos gases de efeito de estufa. Mais de 50% das emissões de CO₂ são atribuídas ao consumo de eletricidade nos sectores residenciais e edifícios de serviços. Além disso, com a proliferação de electrodomésticos, computadores e sistemas de entretenimento, e com o aumento da utilização de sistemas de ar condicionado e ventilação, o consumo de eletricidade disparou desproporcionalmente em relação à utilização de outras formas de energia [45].

Existe portanto, uma forte necessidade de procurar a otimização do uso da eletricidade. A eficiência energética é o modo mais rápido, barato e limpo de otimizar os nossos consumos de energia e deste modo atingir os objectivos de Kyoto para a redução das emissões de gases com efeito de estufa, uma preocupação crescente em todos os setores de mercado [45]. Mais uma vez, as políticas de eficiência energética provaram ser investimentos inteligentes que criam retornos financeiros significativos. Além do mais, estas economias de energia permitem encerrar as centrais elétricas velhas e poluentes, e não construir novas para substituí-las [46].

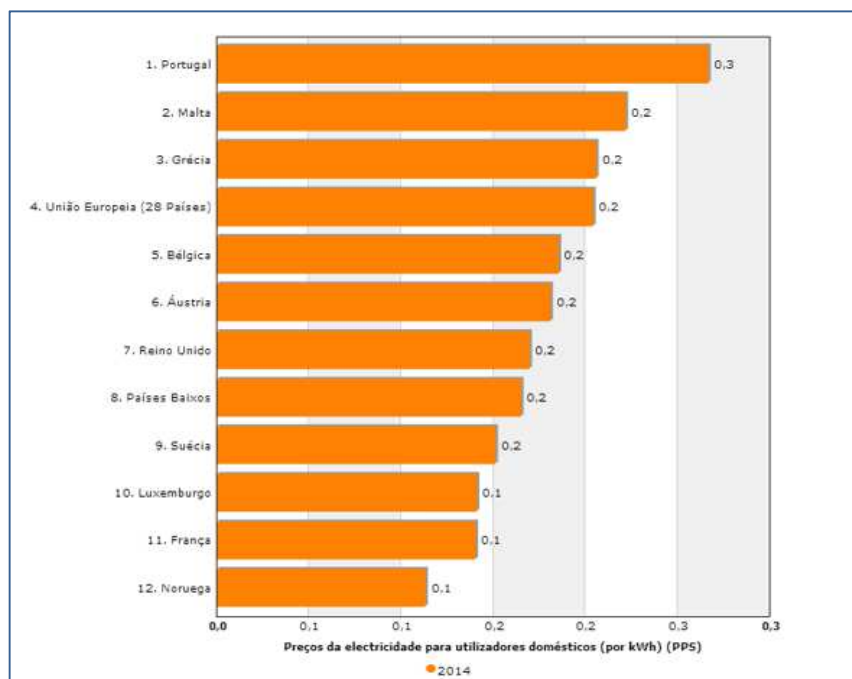


Figura 2.13 - Representação dos preços da eletricidade para consumidores domésticos em alguns países da União Europeia [Retirado da base de dados Pordata].

Mas o que é a eficiência energética? O uso eficiente da energia, por vezes chamado simplesmente de eficiência energética, pode ser definido como sendo o objetivo de reduzir a quantidade de energia necessária para fornecer produtos e serviços. O isolamento de uma habitação doméstica permite o uso de menos energia para aquecimento e arrefecimento de modo a alcançar e manter uma temperatura confortável. A instalação de luzes fluorescentes ou clarabóias naturais permitem reduzir a quantidade de energia necessária para atingir o mesmo nível de iluminação em comparação com o uso de lâmpadas incandescentes tradicionais. Este tipo de ações permitem usufruir de serviços de modo mais eficiente. Contudo, melhorias na eficiência energética são geralmente realizadas mediante a adopção de processos mais eficientes de tecnologia ou de produção, ou pela simples aplicação de métodos comumente aceites para reduzir as perdas de energia [47].

Segundo [48], não existe uma definição geral sobre eficiência energética mas sim várias definições relevantes, sendo que nem todas assentam nos mesmos contextos. O autor apresenta então vários conceitos a aplicar em diferentes contextos:

- Contexto de Marketing: "Eficiência energética é para uma mesma necessidade, um mesmo nível de conforto, um mesmo uso, menor consumo, melhor consumo, menos poluente."
- Contexto Técnico: "A eficiência energética é o desempenho obtido em um determinado sistema (equipamentos, construção, etc) entre a energia primária utilizada e um nível mensurável e tangível de serviço."

- Contexto Popularizado: "A eficiência energética é o conjunto de todas as ações que levam à poupança de energia."
- Contexto *Lobbying*: "Eficiência Energética significa todas as necessidades existentes para reduzir significativamente o consumo de energia primário para um determinado nível de consumo."

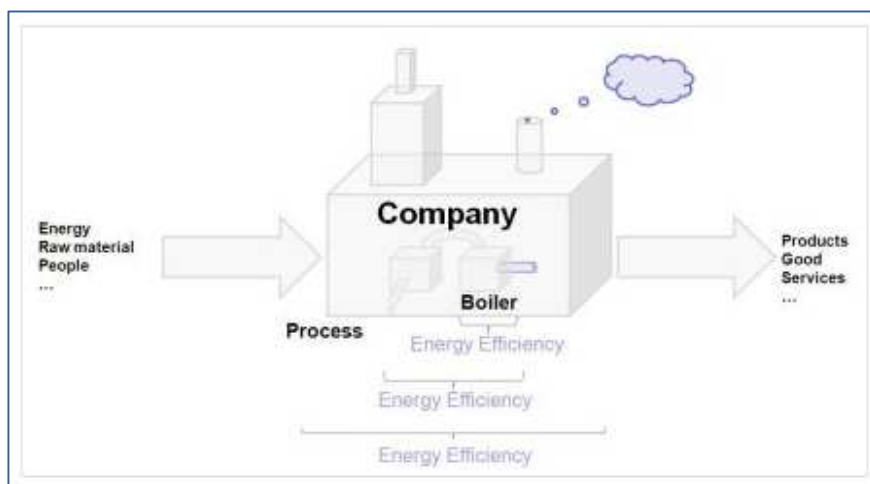


Figura 2.14 - Representação do conceito de Eficiência Energética [48].

Tal como já foi referido, o principal objetivo deste trabalho de dissertação é otimizar a utilização da energia elétrica procurando diminuir os custos operacionais associados à fatura da eletricidade mas mantendo a quantidade de energia consumida inalterável. De forma a atingir estes objetivos serão aplicadas diferentes estratégias de eficiência energética operacional não só no lado da procura mas também relativas à fonte de produção renovável local.

Existem assim várias motivações no sentido de melhorar a eficiência energética. Hoje em dia já existe tecnologia que permite otimizar os nossos consumos de energia elétrica. Contudo é necessário implantar essas tecnologias e medidas de eficiência através de políticas e programas que ajudem a superar as práticas ineficientes impregnadas e capacitar as empresas e os consumidores para que tomem decisões sábias e eliminem os desperdícios no uso da energia [47].

De acordo com a Agência Internacional de Energia, a melhoria da eficiência energética dos edifícios, dos processos industriais e do transporte pode reduzir até um terço as necessidades de energia do mundo em 2050, ajudando também a controlar as emissões globais de gases de efeito estufa [46]. Deste modo, segundo [45], o contexto e as políticas de eficiência energética estarão presentes durante um período de tempo alargado. Para atingir

estes objectivos é necessário realmente mudar, fiscalizar, legislar e normalizar, devendo esses objectivos serem facilitados pelos governantes, que os deverão reforçar todos os dias.

Em todo o mundo estão em vigor diferentes tipos de legislação com vista à obrigatoriedade das empresas, no que respeita à colocação em prática de comportamentos ambientais e de eficiência energética, criando incentivos fiscais e financeiros, para a sua implementação. Todos os sectores são afectados e terão o impacto da legislação, não só nas instalações e edifícios novos, mas também nos edifícios existentes, no ambiente, na indústria ou infra-estruturas. Simultaneamente, surgiram novas normas, que se encontram em fase de implementação [45]. Instalar equipamentos energeticamente eficientes e efectuar planos de melhoria de eficiência energética já não é mais uma opção, mas sim, uma obrigação. Cada país terá de implementar a legislação local e esquemas de incentivos com impactos financeiros os quais não poderão jamais ser ignorados [45].

Por outro lado, a eficiência energética juntamente com as energias renováveis têm sido vistos como os dois pilares de uma política energética sustentável e são as grandes prioridades na hierarquia da energia sustentável. Assim, segundo [49], o rumo à sustentabilidade energética vai exigir mudanças não só na forma como a energia é fornecida, mas na forma como ela é usada, e nesse sentido, reduzir a quantidade de energia necessária para fornecer diversos produtos ou serviços é essencial. Oportunidades de melhoria do lado da procura, são tão ricas e diversificadas quanto as do lado da oferta, e muitas vezes oferecem benefícios económicos significativos. Em muitos países, a eficiência energética também é vista como uma estratégia para a segurança nacional, no sentido em que pode ser usada para reduzir o nível de importações de energia e abrandar o ritmo a que os recursos energéticos domésticos estão a ser esgotados. O uso eficiente de energia é essencial para retardar o crescimento da procura de energia, de modo a que o aumento da produção através de energias renováveis possa fazer cortes profundos no uso dos combustíveis fósseis. A economia de energia sustentável requer grandes compromissos em termos de eficiência energética e de energias renováveis.

Segundo a Schneider Electric [45], grupo multinacional francês especialista global em gestão de energia, para garantir uma eficiência energética significativa, temos de actuar ao longo de três aspectos:

1. Melhorar a eficiência intrínseca da instalação (materiais de isolamento, lâmpadas de baixo consumo, etc).
2. Optimizar pro-activamente a utilização da energia (mantendo constante a temperatura do edifício no nível adequado, desligar as instalações logo que estas não estejam a ser utilizadas, etc).

3. Ajustar pro-activamente a evolução da instalação (idade, diferentes utilizações, ampliação do edifício, etc) através de uma abordagem permanente de melhorias.

Está contudo provado que a boa vontade das pessoas só funciona inicialmente, pelo que após algumas semanas de boas práticas iniciais, as poupanças serão perdidas. A única maneira de obter poupanças de energia sustentáveis é implementar soluções automatizadas as quais ajudarão os consumidores a medir, controlar, analisar e gerir a utilização de energia da sua instalação [45]. Neste sentido, diferentes tipos de componentes do sistema, incluindo elementos de *hardware*, algoritmos de software, conexões de rede e sensores são assim essenciais, sendo estes obrigados a cooperar entre si para fornecer esses vários serviços no contexto de casa inteligente.

O conceito de *Internet of Things*, definida pela Gartner's como "a rede de objetos físicos que contém tecnologia incorporada para comunicar e sentir ou interagir com o estado interno dos objetos ou com o ambiente externo", apresenta-se assim como um primeiro passo para atingir este objetivo. O segmento de consumo da *Internet of Things*, está focado em um vasto conjunto de áreas que são predominantemente centradas na habitação doméstica e no veículo elétrico [50].

Assim, é necessário procurar a otimização da eletricidade através da gestão ativa de algumas cargas controláveis, o que permitirá também a maximização da integração de renováveis. Por outro lado, a tendência provável para tarifas dinâmicas e a necessidade de permitir a penetração de geração local e armazenamento irá promover a transição dos hoje consumidores passivos para consumidores ativos com o então objetivo de realizar uma otimização do uso de todos os recursos energéticos disponíveis numa habitação doméstica [51]. As soluções de controlo de eficiência energética ao nível do setor doméstico poderão representar uma poupança entre 10% a 40% nos consumos [45].

É neste contexto que se encontra o objetivo deste trabalho de dissertação que consiste no desenvolvimento de um sistema de otimização preditiva que permita coordenar, numa perspetiva de eficiência energética operacional, os diferentes recursos de controlo implementados ao nível de uma habitação doméstica, tal como é representado na figura 2.15, de forma a minimizar a medição do consumo líquido, obtendo um input mínimo e portanto mais eficiente.

Neste sentido é fundamental a compreensão do conceito de HEM. O HEM é uma tecnologia que otimiza os consumos e a *produção* de energia de uma habitação doméstica. Através deste sistema, é determinada a operação ótima para o dia seguinte do agendamento de aparelhos domésticos controláveis com base em diversas previsões tais como os consumos, a produção e os preços. Após esta determinação, os sistemas HEM operam em conformidade os diferentes *distributed energy resources* (sigla DERs) presentes ao nível da habitação doméstica, que incluem tecnologias de consumo, produção e armazenamento de energia adotadas pelos

consumidores, como os VEs, painéis solares e sistemas de armazenamento de energia [53], através de uma rede wireless doméstica, *Home Area Network* (sigla HAN), que permite a comunicação de dispositivos interligados entre si, providenciando assim um controlo automatizado sobre várias áreas, incluindo a gestão da energia, a segurança da casa, o entretenimento, a iluminação e as tarefas domésticas, como cozinhar e lavandaria [54]. Os sistemas HEM são normalmente ligados aos sistemas de serviço público através do consumidor por dispositivos autónomos ou incorporados em soluções de medição inteligente [55], os quais representam a fronteira do sistema.

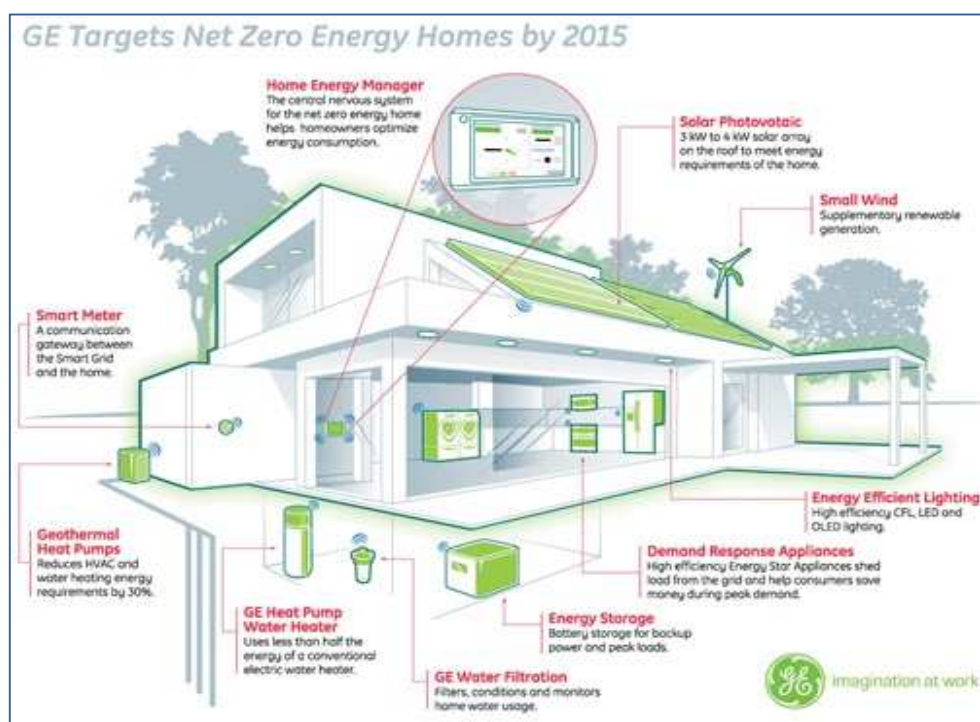


Figura 2.15 - Representação dos diferentes recursos de controlo implementados numa habitação doméstica [52].

Os sistemas HEM podem ser centrados em dispositivos ou centrados em informações. A utilização de uma *advanced metering infrastructure* (sigla AMI), que fornece conexões inteligentes entre os consumidores e os operadores do sistema, permite a adoção de sistemas HEM centrados em informações ao ajudar os consumidores a saber o preço quase em tempo real da eletricidade e, assim, otimizar o seu uso de energia em conformidade e ajudar a RESP a obter informações valiosas sobre o consumo de energia dos consumidores com o objetivo de garantir a confiabilidade do sistema de energia elétrica. A análise de dados pode, então, identificar oportunidades de eficiência energética. Sistemas HEM centrados em dispositivos, fornecem automação e controlo sobre o consumo de energia [54]. A tabela 2 reúne um conjunto de componentes possíveis de implementar nas duas abordagens.

Tabela 2.2 - Componentes possíveis de implementar nas diferentes abordagens dos HEMs.

	HEMs centrados em dispositivos	HEMs centrados em informações
Componentes	<i>In-home display, HEM controller, home gateway, energy services interface, PCTs, DLC, smart plugs, smart appliances, consumer gateway (obrigatório).</i>	<i>Energy usage data, visual display (o consumidor escolhe o dispositivo), analytics, cloud energy services, consumer gateway (opcional).</i>

Como qualquer EMS, os sistemas HEM têm o objetivo de conservar a energia, reduzir os custos e melhorar o conforto. Basicamente, os HEMS oferecem cinco serviços essenciais, sendo estes monitoramento, registo, controlo, gestão e alarmes. Tecnicamente, segundo [56], são constituídos por cinco grupos de componentes:

1. Dispositivos de sensores: os sensores de habitações que são relevantes para aplicações HEM são os de deteção de corrente, tensão, temperatura, movimento, iluminação e ocupação. Estes recebem os parâmetros desejados em diferentes localizações e enviam-nos para um sistema centralizado. Usando esses parâmetros, os aparelhos inteligentes podem ser monitorizados, controlados ou programados para operar num período desejado.
2. Aparelhos de medição: na maioria das vezes, o que pode ser medido pode ser controlado, o que torna estes aparelhos vitais para os sistemas HEM. A chegada de uma AMI, permitiu a medição de informação detalhada baseada no tempo, assim como uma recolha frequente e transmissão de dados para os destinos desejados.

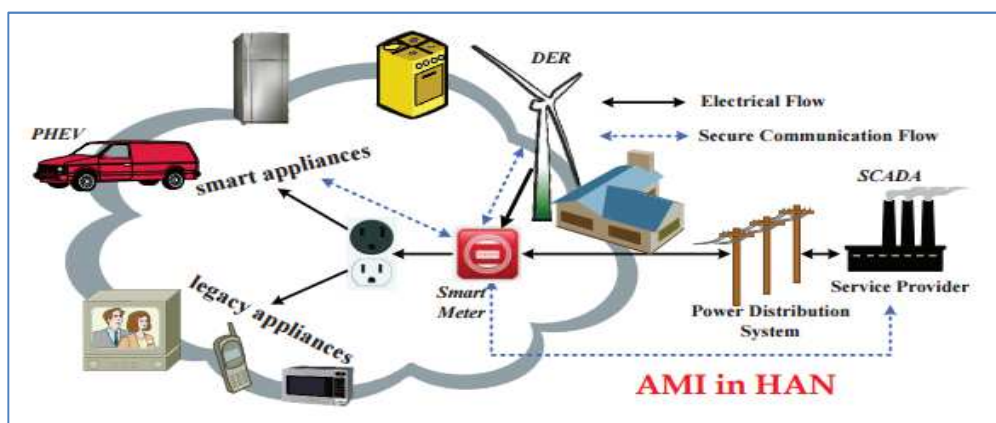


Figura 2.16 - Aplicação de uma AMI numa HAN através do uso de smart meter [57].

3. Aparelhos inteligentes: são aparelhos domésticos com tecnologias de comunicação moderna e inteligência integradas que trocam informações com um sistema de gestão de energia central implementado na habitação doméstica e/ou diretamente com um AMI, permitindo aos dispositivos serem monitorizados e

controlados (*on/off*) remotamente. Permitem comportamentos de eficiência energética. Se a adoção e fabricação de aparelhos inteligentes se tornarem de uso generalizado, podemos ver os consumidores a reduzir a procura em grande escala sem grande esforço.

4. Enabling ICT: a *information and communications technology* (sigla ICT), é o elo de ligação dos sensores, medidores e aparelhos à unidade de controlo ou monitorização (*Wireless* ou tecnologias de comunicação por fios).
5. Sistema de gestão de energia: os princípios de gestão de energia, as plataformas de *software* e a inteligência embutida adoptada em soluções HEM, diferem de fabricante para fabricante. Não há uma solução geral uma vez que vários fornecedores se focam em diferentes aspetos. No geral, os sistemas HEM oferecem qualquer uma das seguintes funcionalidades:
 - Perspetivas sobre dados do uso de energia em diferentes formas de gráficos.
 - Ações automatizadas que oferecem ao consumidor opções de estabelecer prioridades e desejos para operações de aparelhos e/ou geração local.
 - Funções avançadas tais como informação automatizada e controlo local ou de terceiros.
 - Sistemas integrados com todas as características das funções avançadas mas incluindo possibilidade de previsão ou programação de cargas e geração local.

Assim, os sistemas HEM equilibram a eficiência energética e as poupanças com níveis de conforto dos habitantes por meio de ações automatizadas. Contudo, como em qualquer sistema, os sistemas HEM encontram desafios na sua implementação. Segundo [56], o autor apresenta várias razões para que a tecnologia não esteja na sua implementação máxima. Entre essas razões encontram-se as seguintes:

1. Custo: sistemas HEM são relativamente caros, tanto como dispositivos como na sua instalação. Assim os proprietários estão relutantes em investir em sistemas cujos benefícios dificilmente atendem os seus investimentos.
2. Falta de normas para os sistemas HEM: a integração de soluções de sistemas HEM de diferentes vendedores são o maior desafio imposto à tecnologia.

3. Consciência de baixo consumo: os consumidores carecem de informação acerca das funcionalidades dos sistemas HEM. O mercado está bloqueado com várias soluções de sistemas HEM e confundem os consumidores nas suas escolhas, na aceitação e no nível de envolvimento. Para o HEM ser bem sucedido, a eletricidade precisa de ser óbvia, tangível e significativa para os consumidores domésticos.
4. Desenho de sistemas inteligentes: os sistemas HEM exigem decisões inteligentes por parte dos consumidores ou a inteligência é inerente ao sistema de *software/hardware*? Quais são as opções disponíveis para os consumidores? Devido ao diferente nível de conhecimento dos clientes sobre os sistemas HEM, projetar o sistema para atender todas as classes domésticas é um desafio difícil.



Figura 2.17 - Representação dos componentes fundamentais de um sistema HEM [56].

Outra grande restrição dos sistemas HEM é referente à segurança e privacidade. Onde existe interligação de dois sistemas ou redes (com ou sem fios), há questões de segurança e privacidade e o mesmo é verdade no contexto de casa inteligente [58]. Os medidores inteligentes e os aparelhos inteligentes constituem uma explosão de dados relativos a detalhes íntimos da vida diária do consumidor, sendo que ainda não é claro quem terá acesso a essas informações para além do prestador de serviço público. Em [59], os autores “apelam à adoção de um modelo conceitual do Dr. Ann Cavoukian 'SmartPrivacy' para evitar possíveis invasões de privacidade de forma a assegurar a funcionalidade completa das *Smart-Grids*”. *SmartPrivacy* representa um amplo arsenal de proteções, encapsulando tudo que o for necessário para garantir que todas as informações pessoais em poder de uma organização estão devidamente controladas.

A introdução de um elevado conjunto de medidores inteligentes, sensores de baixo custo, cargas inteligentes, e a integração das ICT, se por um lado abriu uma janela para programas de gestão de energia residencial, por outro levou ao aumento das comunicações entre os diferentes aparelhos. Assim, muitos trabalhos estão em desenvolvimento para a concepção de protocolos de comunicação procurando redes de sensores wireless mais eficientes, no sentido de abordar as questões da utilização eficiente da energia, do atraso, da perda de comunicação, da interferência e qualidade de serviço, etc [58]. Segundo a Gartner [54] algumas normas pertinentes para HEM são:

- *OpenADR* para comunicar os preços da energia, assim como mensagens relativas a programas de DR.
- *Green Button* para entregar dados referentes ao uso de energia.
- Comunicações HAN, tais como *ZigBee Smart Energy Profile*, *Z-Wave*, *Wi-Fi* e *Green PHY* (linha de alimentação).

Na verdade, os sistemas HEM, inseridos no novo paradigma das *smart-grids*, podem participar em programas de resposta automática a sinais de DR, que permitem melhorar a confiabilidade da RESP entre outros serviços. DR pode ser definido como uma redução nos padrões de consumo de energia elétrica pelos consumidores, em resposta a aumentos no preço da eletricidade ou a pagamentos de incentivos, destinados a alterar o nível de procura instantânea, ou o consumo total de eletricidade [60], permitindo uma ação voluntária do consumidor. Segundo o autor em [60], é provável que DR se torne um componente chave, senão mesmo a *killer application* para as *Smart-Grids* nas próximas décadas uma vez que 45% dos esperados benefícios destas nos U.S. irá resultar de ações DR e de uma participação ativa mais frequente do consumidor final. Na verdade, sob este paradigma, a tecnologia limitada a exibir preços ou informações de uso para clientes residenciais, leva a que os consumidores descubram quais são as melhores opções energéticas, tornando-se assim consumidores ativos na gestão da sua energia. Assim, as aplicações do cliente que permitam DR podem produzir mais de 59.000 biliões de dólares por ano até 2019 nos U.S. segundo [60].

Os programas de DR, podem-se dividir em duas categorias:

- Programas baseados em incentivos (sigla PBI) - são divididos em programas clássicos e programas baseados no mercado. PBI clássicos incluem programas de controlo de carga direta e programas de carga interruptível/cortada. PBI baseados no mercado incluem programas DR de emergência, de licitação da procura, de mercado de capacidade, e de mercado de serviços auxiliares. Nos PBI

clássicos, os clientes participantes recebem pagamentos de participação, geralmente como uma conta de crédito ou uma taxa de desconto, para a sua participação nos programas. Nos PBI baseados no mercado, os participantes são recompensados com dinheiro pelo seu desempenho, dependendo da quantidade de redução de carga durante os períodos críticos [61].

- Programas baseados em preços (sigla PBP) - programas baseados em tarifas de preços dinâmicos, sendo que destes são apresentados os seguintes:
1. TOU: Sob tarifas TOU, os preços variam de acordo com a hora do dia. Normalmente há duas (Ponta e fora de Ponta), três (Ponta, Cheia, Vazio) ou quatro (Ponta, Cheia, Vazio e Super Vazio) tarifas diferentes aplicadas a períodos fixos durante o dia. As tarifas são pré-determinadas e fixadas antecipadamente, podendo ser comunicadas através de sinais aos consumidores. O objectivo de implementar estas tarifas é incentivar os consumidores a reduzir a procura diária durante os períodos de pico regulares. Essa procura pode ser deslocada para os períodos de menor preço do dia se, por exemplo, os consumidores mudarem o tempo de utilização dos seus aparelhos domésticos [62].
 2. *Critical peak pricing* (sigla CPP): é um conceito semelhante ao TOU, excepto no facto em que só é aplicada sobre um número relativamente pequeno de eventos diários de elevada procura, designados por *critical peaks*. Estes eventos diários são normalmente anunciados pela concessionária com um dia de antecedência, baseado na sua previsão de uma procura relativamente alta. A diferença de preços nos períodos de pico e nos períodos fora desse pico é menos elevada num programa TOU do que num programa CPP, uma vez que neste o preço aplicado durante esses eventos é mais elevado.
 3. *Critical time rebates* (sigla CTR): nestes programas os clientes recebem descontos na fatura de eletricidade para reduzirem o consumo de energia relativamente a uma base específica previamente estabelecida referente à habitação doméstica. Os programas CPP, tal como os programas CPP, são aplicados relativamente aos períodos de *critical peak*. Estes períodos tendem a ocorrer durante os tradicionais períodos de pico ao longo da semana. De notar que a utilização destes dois programas pode ser acompanhada pela utilização de um programa TOU, utilizando um sinal mais forte que alertasse o consumidor para a ocorrência de um *critical peak*.

4. *Real time pricing* (sigla RTP): são programas em que o preço pode variar de hora em hora e é condicionado pelo custo real do mercado de fornecimento de energia elétrica. Assim, o preço não é conhecido com muita antecedência, podendo ser comunicado no dia anterior ou na hora anterior. Não há dois dias com a mesma estrutura de tarifa, e as diferenças de preços entre os períodos de pico e os períodos fora de pico podem ser muito maiores, relativamente ao CPP. Muitos economistas estão convencidos de que os programas RTP são os programas DR mais diretos e eficientes, adequados para os mercados eletricidade competitivos e deve ser o foco dos formuladores de políticas [61].

Através da estratégia de DR, é assim possível reduzir o pico de procura, eliminando o uso de eletricidade, ou deslocando-o para o período fora desse. Nas habitações domésticas, as estratégias comuns são a aplicação de programas baseados em preços dinâmicos, como serão aplicados neste trabalho de dissertação, que cobram mais pela utilização de energia durante o período de pico [63].

Estes programas de DR são considerados segundo [64], como uma opção viável para o futuro da rede de distribuição ao facilitar a ligação a tecnologias de baixo carbono em particular a nível doméstico sem necessidades de as reforçar. De facto, através de sinais de preços diferenciados no tempo podemos providenciar incentivos aos consumidores para diferir o uso de eletricidade e assim libertar capacidade para conetar mais tecnologias de baixo carbono.

Em [64], o autor acredita que o conceito de DR ao nível doméstico está combinado com desafios chave que ainda não foram adequadamente revistos:

1. Apesar de as abordagens baseadas na otimização DR terem sido desenvolvidas em várias literaturas de forma a minimizar o pagamento de eletricidade, formulações relevantes não fornecem modelos genéricos e compreensivos para todas as categorias de aparelhos domésticos.
2. Poucos modelos consideram aparelhos críticos (não controláveis). A modelação desses aparelhos é, segundo o mesmo, crucial para fornecer uma avaliação adequada dos potenciais benefícios dos DR tanto para os consumidores como para a RESP.
3. Capacidade de fornecer soluções para potenciais mudanças nas entradas do controlador durante o dia, em particular sinais de preço.

Apesar dos potenciais benefícios, os DR podem ter um impacto negativo na diversidade de carga o que pode potencialmente resultar na criação de novos picos em intervalos de menores preços, assim como possíveis sobrecargas de componentes da RESP. Assim, o controlo da redução do pico da procura e o controlo da redução dos preços não são aplicados simultaneamente. Alguns autores lidam com este problema através da limitação do valor da procura em cada intervalo de tempo a um valor limite predefinido.

Ao nível de mercado, a evolução dos sistemas de HEM está a progredir de forma irregular, segundo a Gartner [55]. Os mercados de tecnologia do lado do consumidor e os mercados de serviços públicos têm diferentes dinâmicas, e as empresas de serviços públicos têm pouca experiência no fornecimento de produtos de tecnologia para os consumidores. Após algumas experimentações iniciais relativas a tecnologia de gestão de energia do consumidor, os serviços públicos estão a recuar e a concentrar-se no fornecimento de tecnologias para os sistemas HEM, como AMI e tecnologias que permitam DR, como termóstatos de comunicação programáveis.

Desta forma, o mercado de dispositivos HEM está assim a emergir, com empresas como a GE (com o *GE Nucleus*), Cisco (com o *Home Energy Controller CGH-100*), Rebento, ou Opower, os dois últimos sendo selecionados como *2011 Technology Pioneers* pelo *World Economic Forum*. O custo de tais dispositivos, incluindo *hardware*, sistemas de rede de comunicação, instalação, e os custos de programas, como a consciencialização do consumidor, é estimado estar entre os US \$120 e \$340 nos EUA. A maioria das estratégias de marketing dessas empresas sublinham o fato de que o seu dispositivo "coloca as escolhas energéticas nas mãos de consumidores" (GE), "fornece aos consumidores informações sobre seu consumo de energia ao longo do dia" (Cisco), ou permite "decisões mais informadas baseadas em informações em tempo real" (Rebento) . Esta informação está se tornando disponível através de *in-home display* (sigla IHD), *smarth phones*, ou até mesmo através de alertas de *e-mail* [60].

De acordo com o relatório realizado nos Estados Unidos pela *GreenTechMedia* (sigla GTM), *Home Energy Management Systems: Vendors, Technologies, and Opportunities, 2013-2017*, o mercado dos sistemas HEM estava avaliado em US \$1,5 bilhões em 2013, mas com apenas 1,5% a 2,5% de penetração na maioria dos estados, estando preparado para um crescimento significativo. Enquanto o mercado ainda está a crescer, as duas maiores empresas de automação residencial levam já combinadas mais de 2 milhões de clientes que pagam taxas de entre os US \$20 e \$60 de assinatura mensal, o que demonstra um notável potencial do mercado dos sistemas HEM. Observadores da indústria têm vindo a fazer declarações semelhantes desde 2008, mas as parcerias estratégicas recentes no espaço de soluções de serviços públicos e do mercado doméstico vai aumentar as taxas de adesão e o valor do mercado total. Prevê-se assim que o mercado norte-americano de sistemas HEM venha a valer mais de US \$4 bilhões até 2017 [65].

Segundo o autor do relatório *Kamil Bojanczyk*, “no final, tanto os consumidores domésticos como os vendedores podem beneficiar com os sistemas HEM. Inicialmente, os dispositivos dos sistemas HEM começaram por ser representados por tecnologias como termóstatos inteligentes, mas esses dispositivos, no entanto, representaram uma porta de entrada para uma maior adoção de automação residencial. Além disso, os fornecedores alteraram o modelo de negócio para um modelo de subscrição, ajudando a mitigar a incerteza financeira” [65].

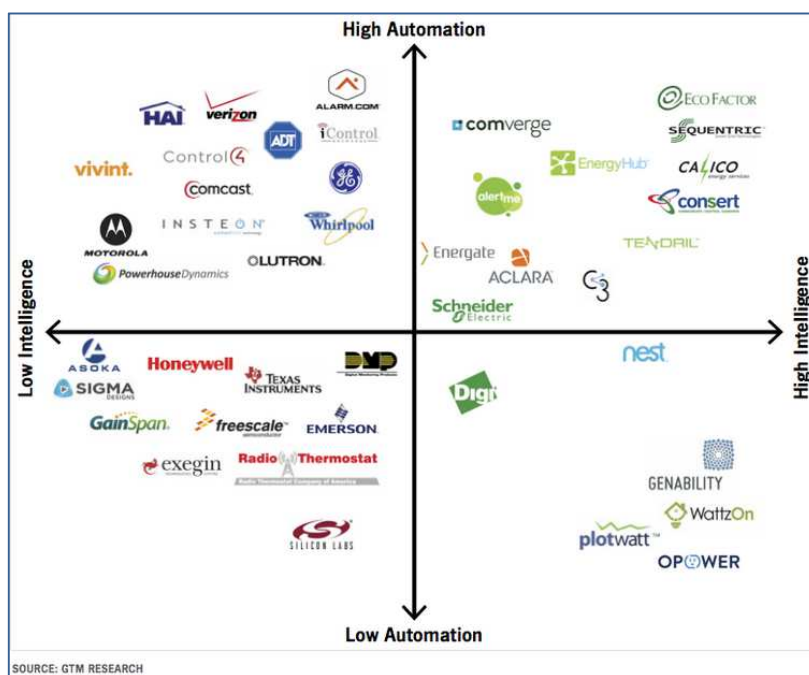


Figura 2.18 - Representação das empresas implícitas no mercado dos HEMS, ordenadas de acordo com o nível de automação e de inteligência [65].

Neste momento só falta que os consumidores se interessem por uma melhor gestão do consumo de energia da sua habitação doméstica tornado-se ativos nela. Através de uma boa cooperação entre os serviços públicos, as empresas de tecnologia inteligente e os consumidores, será possível uma melhor penetração e sustentabilidade dos sistemas HEM [56].

Segundo o autor em [51], o objetivo principal da aplicação destes sistemas não é garantir a redução do consumo mas sim baixar a conta da eletricidade ao otimizar o uso integrado de recursos de energia e reformular o perfil de consumo de eletricidade do consumidor. Assim, o perfil do consumo será reformulado, de tal forma que a maior taxa de consumos ocorre quando:

- Os preços são mais baixos.
- Há uma grande produção de energia renovável local.

- A energia está disponível nos sistemas de armazenamento e é economicamente vantajoso usá-la em vez de a vender ou manter armazenada.

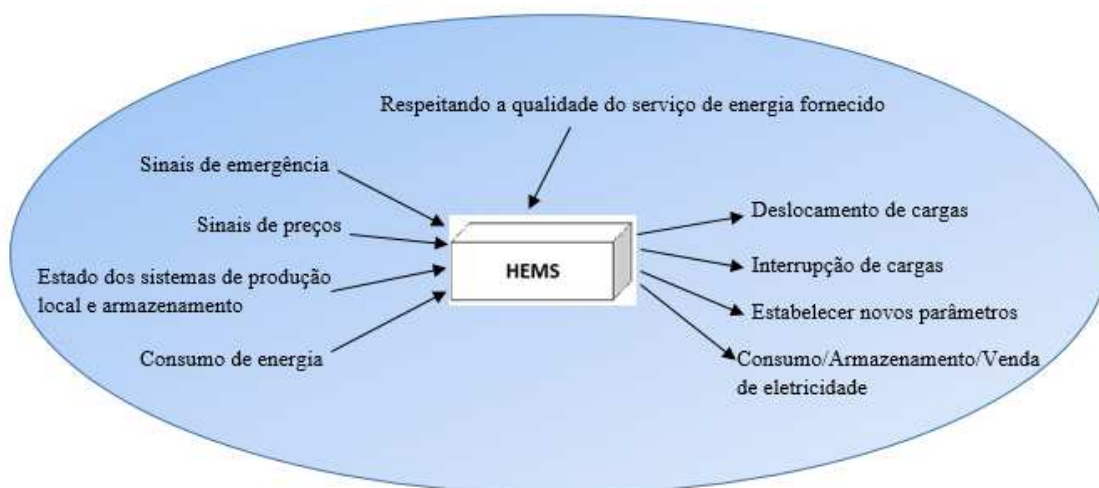


Figura 2.19 - Representação da aplicação de um sistema HEM.

A penetração dos sistemas HEM no setor doméstico irá assim permitir à RESP uma mudança, passando de estratégias tradicionais de operação de seguimento de carga (produção segue a procura) para estratégias de adaptação de carga (carga segue oferta) [51]. Encontrar o horário ótimo para o funcionamento dos diversos aparelhos, gerir os sistemas de armazenamento de energia e decidir se consumimos, vendemos ou armazenamos a energia produzida pelos sistemas de geração local, são os principais objetivos destes sistemas HEM, os quais têm de fazer parte de uma decisão conjunta a fim de alcançar a redução na fatura da eletricidade sem perder a qualidade de serviço de energia fornecido e tomando em consideração diferentes sinais de entrada [51].

2.7 Otimização energética de uma habitação doméstica

Sistemas inteligentes formais são necessários a nível residencial, não só para informar os clientes sobre o seu consumo de energia, mas também para entender o seu conforto e as suas preferências ambientais, por meio de configurações pré-programadas que escondem a complexidade da otimização, o problema de controlo e agendamento dos consumos de energia. É assim possível ao consumidor automaticamente reagir a sinais de preços dinâmicos, a fim de otimizar o consumo de energia do consumidor final e reduzir a sua factura de eletricidade. Neste cenário, algoritmos de otimização de energia são necessários para permitir que tais sistemas inteligentes autonomamente determinem o ótimo esquema de consumo de energia de uma habitação, dado ao longo de um determinado período de tempo, em resposta a um sinal de preço dinâmico potencialmente atualizado a cada 15 minutos [60].

Em matemática, o termo otimização, ou programação matemática, refere-se ao estudo de problemas em que se busca minimizar ou maximizar uma função através da escolha sistemática dos valores de variáveis reais ou inteiras dentro de um conjunto viável [66]. À medida que o número de funções e o número de variáveis aumentam, a dificuldade em se determinar o conjunto de soluções ótimas também aumenta. É neste contexto que surge a necessidade de desenvolver técnicas matemáticas e computacionais que refinem o processo de otimização, dado que este é amplamente utilizado para resolver problemas de engenharia [67]. Assim, em problemas de engenharia, de administração, de logística, de transporte, de economia, de biologia ou de outras ciências, quando se consegue construir modelos matemáticos bastante representativos dos respetivos sistemas dinâmicos em estudo, é possível aplicar as técnicas matemáticas de otimização para maximizar ou minimizar uma função previamente definida como índice de desempenho (sigla ID), ou índice de performance (sigla IP), visando encontrar uma "solução ótima" do problema, isto é, que resulte no melhor desempenho possível do sistema, segundo este critério de desempenho previamente definido (ID) [66].

No sentido de atingir os benefícios inerentes à utilização dos sistemas HEM e atingir a eficiência energética dentro de uma habitação doméstica é então necessário um certo nível de automação que permita coordenar a ação dos diferentes componentes que integram o sistema HEM e que permita atingir um objetivo simples ou múltiplo pretendido pelo consumidor para obter a sua satisfação. Assim, através de uma função objetivo que se pretende minimizar (custo ou o consumo energia, entre outros) ou maximizar (eficiência, desempenho ou lucro, entre outros), sujeita a diferentes restrições de igualdade e desigualdade referentes aos diferentes componentes do sistema e a todas as restrições impostas pelo próprio consumidor, é possível encontrar uma solução ótima que satisfaça os consumidores.

Segundo [2], um otimizador deve definir os seguintes modelos quando se considera o problema de agendamento do funcionamento dos aparelhos domésticos:

- Previsões (consumos, produções locais, preços, etc) - apesar de não ser controlada ao contrário do planeamento, em que decidimos e influenciamos a otimização, a previsão permite gerar tempo para decidir o controlo;
- Regime de preço;
- Modelo físico do dispositivo;
- Restrições de conforto (se for o caso).

Os estudos realizados no âmbito da otimização energética de uma habitação doméstica podem ter como função objetivo somente a minimização dos custos relacionados aos consumos de energia (função objetivo simples), representado esta a principal função abordada em estudos de otimização ao nível dos edifícios. Em [68], é analisado um ótimo agendamento de aparelhos domésticos com dispositivos de armazenamento considerando a minimização do custo total como o objetivo do problema de otimização. Por outro lado em [69] *Mohsenian-Rad* e *Leon-Garcia* propuseram um algoritmo de otimização para minimização das faturas de eletricidade dos consumidores, considerando os níveis de conforto para estes como restrições do problema e não como uma função objetivo a maximizar. Estes estudos contudo falham na consideração de outros objetivos competitivos do problema de otimização relevantes ao nível do setor doméstico, como por exemplo os níveis de conveniência e de conforto dos consumidores.

Nesse sentido, posteriormente, vários estudos consideraram este problema de otimização como mais do que um simples objetivo de minimização de custo, entrando também em consideração com o nível de satisfação do consumidor relacionado ao seu conforto, o qual é pretendido maximizar. Surgiu assim a necessidade de resolução de um problema multiobjetivo. Segundo [70], a gestão ótima de energia em habitações domésticas relativa a objetivos múltiplos e por vezes conflituosos é um dos problemas mais desafiadores associado com a operação das micro-redes inteligentes. Vários métodos têm sido propostos para resolver estes problemas de objetivos múltiplos, contudo, segundo [71], *scalarization* apresenta-se como um método mais simples relativamente a outros. A cada função custo é atribuído um fator de peso, sendo simplificada através do critério da soma ponderada. Assim, este método transforma o problema de objetivos múltiplos num problema de objetivo simples com a ajuda da *scalarization* linear.

Geralmente, as funções objetivo são igualmente significativas e, provavelmente, conflituosas. Além disso, normalmente, nenhuma solução ótima é comum a todos os objetivos. Portanto, o problema de otimização de objetivos múltiplos procura uma relação de compromisso em vez de uma solução simples. A otimização de objetivos múltiplos inclui a procura do conjunto de soluções ideais não dominadas com negociações entre diferentes objetivos e a seleção e avaliação das respetivas soluções baseadas em mais informação disponível, tais como priorizações, custo de oportunidade, satisfações, etc [71].

Um exemplo desta aplicação é o apresentado em [72], onde é formulado um modelo matemático para otimizar simultaneamente o custo da faturação o qual se pretende minimizar, e a satisfação de um consumidor residencial que se pretende maximizar, usando uma infraestrutura de comunicação de uma *Smart-Grid*. Neste sentido, o autor descreve uma formulação em que recorre ao conceito de soluções não dominadas ou *Pareto Front* que, segundo este, é uma técnica de otimização fácil de aplicar para minimizar ou maximizar as múltiplas funções objetivos compreendidas num vetor. Para avaliar a satisfação do

consumidor o autor revela a necessidade de um parâmetro que quantifique a não satisfação do consumidor por ter de fazer uso dos seus aparelhos a certas horas, sendo para isso necessária a realização de um horário relativo ao uso dos aparelhos para o dia seguinte. Na realidade a satisfação do consumidor como função objetivo do problema a maximizar pode levar à imposição de restrições por parte do mesmo relativas ao uso de determinados aparelhos em algumas horas do dia independentemente dos preços que ocorrem a essa hora.

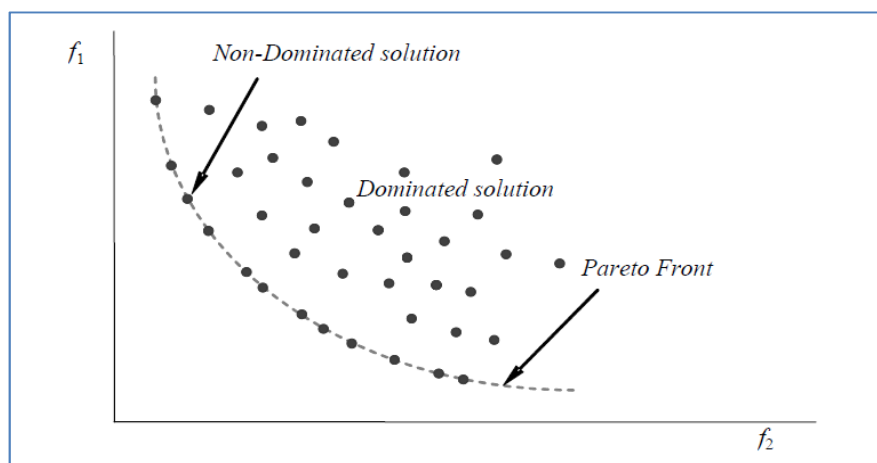


Figura 2.20 - Ilustração da aplicação do método de soluções não dominadas para a minimização de um problema de otimização com objetivo múltiplo [72].

A diversidade de literaturas em que são apresentados diversos estudos referentes a técnicas de otimização aplicadas a problemas relacionados com a eficiência energética de uma habitação doméstica contendo diferentes componentes como os presentes no sistema energético de habitação doméstica referente ao trabalho de dissertação, nomeadamente produção fotovoltaica para autoconsumo, bomba de calor, VE e sistemas de armazenamento por baterias, é enorme. De seguida são apresentados alguns desses exemplos de estratégias desenvolvidas pelos respetivos autores no sentido de modelizar a otimização de sistemas HEM.

A otimização através da utilização de *Genetic Algorithm* (sigla GA), fornece uma ferramenta poderosa para obter a capacidade ótima de energia solar, energia eólica e armazenamento num sistema híbrido. Este algoritmo evolucionário em [73] é preferido à abordagem clássica de otimização pois consegue lidar com o problema não linear e não convexo do dimensionamento dos componentes de um sistema híbrido. O método é proposto pelo autor para procurar minimizar o custo e aumentar a eficiência. Nos resultados é mostrado que através deste método a eficiência do sistema é melhorada assim como um menor número de variáveis é fornecida pelo GA.

Em [60] é mostrado num caso simples que o problema de otimização associado à gestão da energia numa habitação tem uma significativa complexidade. A solução para o problema apresentado exigiu algoritmos de otimização robustos. Os resultados obtidos através de

simulações, sugerem ao autor que a teoria da *Mixed-Integer Linear Programming* (sigla MILP), pode ser usada para formular o problema de otimização e, determinar com sucesso o agendamento ótimo ao longo de um horizonte de tempo dado. O sistema elétrico da habitação considerada consiste entre outros num conjunto de módulos fotovoltaicos, um sistema de armazenamento de energia isolado, um VE, e um conjunto de aparelhos controláveis e não controláveis. Uma particularidade do método proposto é o facto da otimização do uso de energia ser aplicada globalmente, integrando não só as cargas domésticas, mas também os recursos de produção local e os sistemas de armazenamento. Por outro lado, em [70] é desenvolvido um modelo *Multiobjective Mixed-Integer Nonlinear Programming* (sigla MO-MINLP), para otimizar o uso de energia numa habitação doméstica considerando um balanço significativo entre a poupança de energia e um tipo de vida confortável.

Uma comparação de abordagens de otimização estocástica e otimização robusta para gestão DR em tempo real de aparelhos domésticos é realizada em [74]. A otimização estocástica adopta uma abordagem baseada em cenários através da simulação de *Monte Carlo* para minimizar o pagamento associado à fatura da eletricidade esperada para o dia inteiro. Por outro lado a otimização robusta adopta intervalos de incerteza de preço para simular a mesma em tempo real, podendo estes derivar de um modelo de previsão de preços. Resultados numéricos mostram que com a proposta gestão DR em tempo-real, ambas as abordagens conseguem atingir uma diminuição de custos relativos à fatura da eletricidade. Adicionalmente, avaliações numéricas indicam que embora o cenário da abordagem baseada em otimização estocástica introduza maior carga computacional, ela fornece um menor custo quando comparada com abordagem robusta. Ambos os métodos podem ajudar o consumidor a lidar com os riscos financeiros trazidos pela incerteza dinâmica de preços em tempo real. As duas abordagens são simuladas como problemas MILP.

Em [64] é apresentado um controlo HEM baseado numa otimização abrangente e geral incorporando várias classes de aparelhos domésticos. As operações dos diferentes tipos de dispositivos são controladas em resposta a sinais de preços dinâmicos para reduzir a conta do consumo de eletricidade abaixo de um nível desejado, enquanto minimiza o volume diário de energia reduzida e portanto considerando o nível de conforto do consumidor. O DR proposto nesta literatura tem como objetivo descobrir um melhor agendamento dos aparelhos controláveis ao longo de um horizonte de tempo finito correspondente a um dia para minimizar a fatura elétrica sob a boa vontade do consumidor para pagar enquanto atinge um nível máximo de satisfação. Este nível de satisfação do consumidor é representado pela percentagem de volume de corte de energia diário relativo ao potencial consumo de energia de aparelhos interrompíveis.

A formulação proposta para o *Automated Demand Response* (sigla ADR), foi modelada e resolvida com recurso à linguagem de programação matemática AIMMS. O *outer*

approximation algorithm (sigla AOA) da AIMMS é adotado para resolver o problema MINLP. O AOA resolve iterativamente modelos de programação não linear (sigla PNL) e modelos de *Mixed-Integer Programming* (sigla MIP) no sentido de identificar a melhor solução. Em particular, os algoritmos CONOPT e CPLEX são usados para PNL e modelos do MIP, respectivamente. A fim de obter uma solução viável, o AOA também foi personalizado através da incorporação de um algoritmo *multistart*, que resolve o modelo PNL para várias condições iniciais, evitando assim também ficar preso em soluções locais. A figura 2.21, ilustra um algoritmo proposto pelo autor que sumariza o processo iterativo formulado na ferramenta AIMMS para encontrar a máxima satisfação necessária para minimizar o pagamento de eletricidade abaixo de um nível desejado. A ferramenta AIMMS é utilizada como *Mixed-Integer Nonlinear Programming Software* para otimização.

Algorithm 1 Iterative Algorithm for Cost-Comfort Tradeoff

- 1: Set the desired cost ($cost^{des}$) and the controller inputs
- 2: Initialize the satisfaction factor to unity $S_{j=1}^{des} = 1$
- 3: Solve the MINLP problem Minimizing $cost_j$ (14), subject to the constraints (1-16)
- 4: While $cost_j > cost^{des}$ and $S_j^{des} > 0$
- 5: Set $S_j^{des} = S_{j-1}^{des} - \Delta$
- 6: Solve MINLP problem again
- 7: End While

Figura 2.21 - Algoritmo referente ao processo iterativo formulado no AIMMS para encontrar o máximo nível de satisfação necessário para minimizar os pagamentos de eletricidade abaixo do desejado nível [64].

Em [2] são descritos e analisados diversos modelos de algoritmos implementados no sentido de melhorar a gestão de energia de uma habitação doméstica. A diversidade de modelos é visível na tabela 3, onde são sumarizados as descrições de alguns tipos de modelos implementados em diferentes literaturas.

Tabela 2.3 - Sumário de várias descrições relativas a técnicas matemáticas de otimização de sistemas.

Técnica Matemática	Ref.	Descrição
1. Heuristic Search	[75]	Em <i>Robust scheduling of residential distributed energy resources using a novel energy service decision-support tool</i> , a utilização de programação estocástica para agendamento de quatro DERs foi analisado, com a função objetivo de maximizar o benefício líquido do consumidor para um conjunto de estudos de caso. O estudo de caso ideal é obtido através da aplicação de técnicas de redução de cenário heurístico baseadas no uso de <i>co-evolutionary particle swarm optimization</i> (sigla CPSO). Os problemas de otimização abrangem a natureza estocástica da procura por serviços de energia, a presença de um sistema de armazenamento de energia, e o regime de preços dinâmicos de pico. Os resultados mostram que o agendamento para o dia seguinte de DERs leva a um custo mais baixo do que o esperado. O longo tempo de computação não é considerada uma restrição, porque o agendamento dos recursos é realizado <i>off-line</i> .

2. Programação Linear	<p>[76] Em <i>Appliance commitment for household load scheduling</i>, é apresentado um algoritmo baseado num problema bem conhecido em sistemas de energia: o problema de <i>unit commitment</i>. A nova abordagem é transferir esse tipo de algoritmo para um problema de compromisso do dispositivo que tem como alvo o agendamento de cargas caracterizadas por comportamento controlado por termóstato. A otimização de sequência linear melhorada por algoritmo de ciclos múltiplos, tem como objetivos tanto a minimização dos pagamentos dos consumidores como a maximização do conforto. Os resultados mostraram um algoritmo rápido, robusto e flexível.</p> <p>[77] Em <i>An event driven smart home controller enabling cost effective use of electric energy and automated demand side management</i>, é apresentada uma estratégia de controlador de casa inteligente para efetuar a gestão de energia elétrica numa habitação doméstica. O problema é modelado como um problema de programação linear binário para determinar o melhor momento para operar os aparelhos, com a consideração da restrição de limite de potência virtual. As variáveis de decisão representam os tempos de arranque dos aparelhos dentro de um período específico de tempo planejado. Um valor limite de potência virtual substitui o limite de potência contratual enquanto restrição, enquanto que o consumo de energia previsto de cargas controláveis, monitorizadas e detectáveis é a base da introdução de uma restrição de sobrecarga relacionada com as cargas programáveis.</p>
3. Mixed-Integer Non-Linear	<p>[78] Em <i>CONSERVE: Client side intelligent power scheduling</i>, é explorado a realização de um possível agendamento de custos ótimo para o dia seguinte que inclui a consideração de aquecimento de água inteligente e a minimização de encargos de energia em casa inteligente através de um agente autónomo do lado do cliente. Modelos estáticos físicos e restrições foram desenvolvidos para a tecnologia de aquecimento de água. O esquema de preços é em tempo real, e é mostrado que a programação linear pode resultar numa solução de custo ótimo. Os autores também discutem os problemas associados com a aplicação do problema de programação linear a um grande problema dinâmico e os <i>trade-offs</i> inerentes aos métodos de programação heurísticos. O agendamento ótimo para o dia seguinte do aquecimento de água é comparado com um modo de despacho inteligente. Os autores planeiam estender os modelos físicos para incluir dispositivos de casa inteligente adicionais e desenvolver estratégias para alavancar a gestão tradicional de energia para gestão por cooperativas locais multi-agentes.</p>
4. Redes Neurais	<p>[79] Em <i>Energy management for buildings and microgrids</i>, é apresentado um problema de otimização em grande escala para decisões de gestão de energia e de controlo relativos à construção de um sistema de micro-rede. Aspectos específicos do lado da procura e do lado da oferta incluem geração de renovável local, tecnologias de armazenamento, carros elétricos, gestão de carga e um esquema de preços dinâmico. É necessária uma otimização <i>mixed-integer non-linear</i> e, para o caso de estudo específico de um hospital holandês, os autores descreveram uma solução de gerenciamento de energia baseada nesta otimização que fornece uma análise das poupanças económicas.</p>
5. Game Theory	<p>[80] Em <i>Optimization of the use of residential lighting with neural network</i>, é utilizado um modelo de redes neurais para economizar a energia programando horários para as luzes em locais diferentes numa habitação. Os vetores de entrada para as redes neurais são as datas de feriado, a hora do dia, e o dia da semana, e os vetores dos objetivos correspondem às poupanças totais e personalizadas.</p>
6. Outros	<p>[81] Em <i>Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart-grid</i>, o conceito de <i>Game Theory</i> (sigla GT) é utilizado para formular um jogo de agendamento do consumo de energia, em que os jogadores são os consumidores e as suas estratégias são os horários diários dos seus aparelhos e cargas. A empresa de serviços públicos assume adotar tarifas de preços adequadas que diferenciam o uso de energia de acordo com o tempo e com o nível. Para um cenário comum, com uma única empresa de serviços públicos a servir vários clientes, o desempenho ideal global em termos de minimização dos custos de energia foi demonstrado como estando no equilíbrio de Nash. A estratégia DSM proposta exige que cada consumidor simplesmente aplique a sua melhor estratégia de resposta relativamente à carga total atual e às tarifas disponíveis no sistema de distribuição de energia. Os incentivos são proporcionados para a participação no jogo e para a subscrição de outros serviços. Os resultados das simulações confirmam que a abordagem proposta pode reduzir a taxa de pico médio da procura total, os custos totais, e as taxas diárias de energia elétrica de cada usuário.</p> <p>[82] Em <i>Multi-criterion mining algorithm for efficient home energy management system</i>, um módulo de sistema HEM baseado num algoritmo de <i>multi-criterion mining</i> é analisado, determinando o estado de operação (<i>on/off</i>) de aparelhos conectados a um sensor de energia para que possam ser controlados de forma autónoma para melhorar a eficiência energética. O algoritmo de <i>mining</i> é combinado com abordagens geométricas e estatísticas para agrupamento de dados para que o número de potenciais grupos seja reduzido sem uma redução na dimensionalidade do problema de agrupamento, realçando a precisão e otimizando o tempo.</p>

Dentro dos estudos das literaturas analisadas, verifica-se que não existe uma tendência para o uso de uma determinada técnica matemática na otimização da eficiência energética operacional dos sistemas elétricos presentes ao nível de uma habitação doméstica.

De um ponto de vista prático, o desenvolvimento de algoritmos de otimização de energia ao nível doméstico irá procurar primariamente beneficiar os consumidores finais, permitindo a concepção e implementação de controladores de energia completamente autónomos para a otimização do uso de energia. Os algoritmos de otimização de energia terão então, um impacto direto na redução de custos e de energia [60]. Por outro lado, os algoritmos de otimização de energia também terão um impacto sobre a sustentabilidade e a diferenciação ao nível do setor doméstico. Assim, algoritmos de otimização de energia integram não só as preferências de conforto, mas também preferências ambientais e preferências sociais dos consumidores finais.

Capítulo 3

Modelização dos diversos componentes

O presente capítulo descreve os diferentes modelos aplicados aos diversos componentes presentes ao nível do sistema energético de habitação doméstica de forma a posteriormente estes serem aplicados ao algoritmo referente ao sistema de otimização.

3.1 Formulação do problema

O presente trabalho de dissertação é aplicado a um sistema energético de uma habitação doméstica que, para além de algumas das cargas típicas, contém um sistema de produção de energia fotovoltaica segundo o regime de autoconsumo, um veículo elétrico, uma bomba de calor e um sistema de armazenamentos por baterias. Na figura 3.1 é apresentado um esquema relativo aos compartimentos da habitação doméstica no qual este estudo se insere.

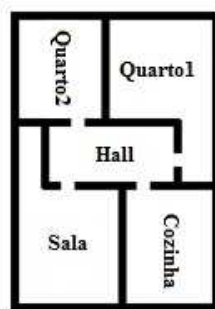


Figura 3.1 - Esquema relativo aos diferentes compartimentos da habitação doméstica referente ao trabalho de dissertação.

O estudo será efetuado para um período de simulação de uma semana, 03-03-2014 a 10-03-2014, sendo que os dados analisados serão discretizados em intervalos de tempo de quinze minutos ($\Delta t = 15 \text{ min}$). Os custos associados à energia consumida líquida relativa ao sistema energético da habitação doméstica, serão calculados de acordo com tarifas dinâmicas, as

quais são variáveis de acordo com o período horário correspondente (Ponta, Cheia, e Vazio). Estes variam ao longo do dia nos diferentes períodos e consoante o próprio dia ou seja, se é dia útil, sábado ou domingo. A tabela 3.1 ilustra qual o período horário aplicado ao longo das 24 horas de acordo com o tipo de dia.

Tabela 3.1 - Períodos horário aplicados ao longo do período de simulação.

Hora	Dia útil	Sábado	Domingo
00:00	Vazio	Vazio	Vazio
01:00	Vazio	Vazio	Vazio
02:00	Vazio	Vazio	Vazio
03:00	Vazio	Vazio	Vazio
04:00	Vazio	Vazio	Vazio
05:00	Vazio	Vazio	Vazio
06:00	Vazio	Vazio	Vazio
07:00	Cheia	Vazio	Vazio
08:00	Cheia	Vazio	Vazio
09:00	Cheia	Vazio	Vazio
09:30	Ponta	Cheia	Vazio
10:00	Ponta	Cheia	Vazio
11:00	Ponta	Cheia	Vazio
12:00	Cheia	Cheia	Vazio
13:00	Cheia	Vazio	Vazio
14:00	Cheia	Vazio	Vazio
15:00	Cheia	Vazio	Vazio
16:00	Cheia	Vazio	Vazio
17:00	Cheia	Vazio	Vazio
18:00	Cheia	Vazio	Vazio
18:30	Ponta	Cheia	Vazio
19:00	Ponta	Cheia	Vazio
20:00	Ponta	Cheia	Vazio
21:00	Cheia	Cheia	Vazio
22:00	Cheia	Vazio	Vazio
23:00	Cheia	Vazio	Vazio

Outro fator que condiciona as tarifas é o facto de estarmos perante horário de Verão (Período II e Período III) ou horário de Inverno (Período I e Período IV). A tabela 3.2 ilustra os meses associados a cada período.

Tabela 3.2 - Meses correspondentes aos diferentes Períodos.

Período I	Período II	Período III	Período IV
Janeiro	Abril	Julho	Outubro
Fevereiro	Maio	Agosto	Novembro
Março	Junho	Setembro	Dezembro

No caso relativo ao trabalho de dissertação, o período associado será assim o período I, ao qual pertence o mês de Março. Os valores correspondentes a cada período horário relativos ao período I são de seguida ilustrados na tabela 3.3. Serão utilizados os valores fixados pela Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (sigla ERSE) para um consumidor em Baixa Tensão Normal (sigla BTN) até 20,7 kVA, sendo que a potência contratada relativa ao sistema energético de habitação doméstica do trabalho de dissertação é de 10,35 kVA.

Tabela 3.3 - Valores das tarifas aplicadas a cada período horário.

Período	Tarifa (€/kW)
Ponta	0,2384
Cheia	0,0936
Vazio	0,0382

Estas tarifas condicionarão o custo da energia elétrica ao longo do período de simulação, sendo que o cálculo do custo foi assumido como sendo dado pela equação (3.1).

$$Custo [h] = \frac{TermoFixo}{24} + ConsumoLiq [h] * (Tarifa [h] + PreçoMercado [h] * 2.4) \quad (3.1)$$

onde TermoFixo corresponde ao termo relativo ao Uso Global do Sistema (sigla UGS), igual para todas as horas e períodos, ConsumoLiq [h] corresponde ao valor final da energia consumida líquida no intervalo de tempo h, Tarifa [h] corresponde ao valor da tarifa aplicada segundo o período horário no intervalo de tempo h, PreçoMercado [h] corresponde ao valor a remunerar por cada kWh (€/kWh) que é fornecido à RESP aplicado no intervalo de tempo h.

O valor usado para o TermoFixo foi 0,3702 (€/dia), o qual foi dividido por 24 horas obtendo-se assim o termo correspondente a cada hora. Uma vez que cada hora foi discretizada em intervalos de tempo referentes a 15 minutos, o valor utilizado no cálculo foi dividido por quatro, de forma a obter o valor para cada intervalo de tempo.

Da mesma forma, a energia injetada líquida relativa ao sistema energético da habitação doméstica do trabalho de dissertação será remunerada de acordo com os valores de preço de mercado. Serão assim aplicados os valores de mercado estipulados pela Redes Energéticas

Nacionais (sigla REN). Estes valores variam ao longo do dia, assim como de dia para dia. A remuneração é assim dada pela equação (3.2).

$$Re\text{muneração}[h] = PreçoMercado[h] * InjetadaLiq[h] * 0.9 \quad (3.2)$$

onde InjetadaLiq [h] corresponde ao valor da energia injetada líquida no intervalo de tempo h.

De seguida são apresentados os modelos físicos correspondentes aos diferentes componentes presentes ao nível do sistema energético de habitação doméstica relativa ao trabalho de dissertação.

3.2 Modelização das cargas típicas

Relativamente às diferentes cargas típicas que constituem o sistema energético da habitação doméstica do trabalho de dissertação, estas são divididas em dois grupos:

- Cargas controláveis, cuja procura de energia pode ser deslocada ao longo de um certo período de funcionamento definido pelo consumidor de modo a otimizar o custo associado ao seu consumo, e satisfazendo assim as preferências do consumidor.
- Cargas não controláveis, cuja procura de energia tem de ser satisfeita aquando da necessidade do consumidor, correspondendo a um consumo instantâneo que não pode ser agendado. É o caso da iluminação, TV, ou de consumos contínuos como o frigorífico e o congelador.

As cargas controláveis da habitação são representadas na tabela 3.4., fazendo parte destas a máquina de lavar a roupa, a máquina de secar roupa e a máquina de lavar loiça, todas integradas na divisão Cozinha. A sua operação é dividida em vários ciclos de funcionamento, sendo que a cada ciclo está associada uma potência e uma duração. É admitido que o funcionamento da máquina é contínuo ou seja,

$$Início[i] + DuraçãoTotal[i] = Fim[i], \forall i \in N_{TotalMaquinas} \quad (3.3)$$

onde Início[i] corresponde ao instante de início de operação da máquina i, DuraçãoTotal[i] corresponde à duração total de operação da máquina i, Fim[i] corresponde ao instante de fim de operação da máquina i, NtotalMaquinas corresponde ao número total de

cargas controláveis presentes na habitação doméstica. O valor de *DuraçãoTotal* [*i*] é dado pela equação (3.4).

$$DuraçãoTotal[i] = \sum_{j=1}^{Ntotalciclos} Duração[i][j], \forall j \in Ntotalciclos \quad (3.4)$$

onde *Duração*[*i*][*j*] corresponde à duração de operação do ciclo *j* da máquina *i*, *Ntotalciclos* corresponde ao número total de ciclos de operação relativos às diferentes cargas controláveis.

Tabela 3.4 - Dados relativos às cargas controláveis.

Cargas controláveis			
Máquina	Ciclo Funcionamento	Potência(W)	Duração (min)
Máquina Lavar Roupa	Ciclo 1	0,45	30
	Ciclo 2	0,037	120
Máquina Secar Roupar	Ciclo 1	0,625	60
	Ciclo 2	0,125	60
Máquina Lavar Loiça	Ciclo 1	0,48	30
	Ciclo 2	0,03	60
	Ciclo 3	0,48	60

Relativamente às cargas não controláveis foram admitidos dois tipos de dados para a sua representação. Os primeiros são relativos a valores preditivos sem incerteza dos consumos verificados ao nível da habitação doméstica introduzidos pela operação de funcionamento das cargas não controláveis, os quais são representados na figura 3.2. Os segundos são relativos a valores preditivos com incerteza dos consumos relativos às cargas não controláveis, e são representados na figura 3.3. De notar que estes valores representam uma previsão grosseira de forma a permitir analisar o grau de impacto que o erro introduzido por estes pode ter no sistema de otimização, uma vez que é criado um padrão baseado na média dos valores preditivos sem incerteza o qual é admitido como sendo igual para todos os dias. Na realidade, os valores referentes aos dados preditivos com incerteza possuiriam erros de previsão menores. Na tabela 3.5 são enumeradas as diversas cargas não controláveis, assim como a divisão referente à habitação doméstica em que se encontram e o respetivo consumo. Para a iluminação da habitação foram escolhidos três tipos de cargas distribuídas ao longo desta, sendo elas:

1. *Light Emitting Diode* (sigla LED);

2. *Compact Fluorescent Lamp* (sigla CFL);
3. Tubos fluorescentes.

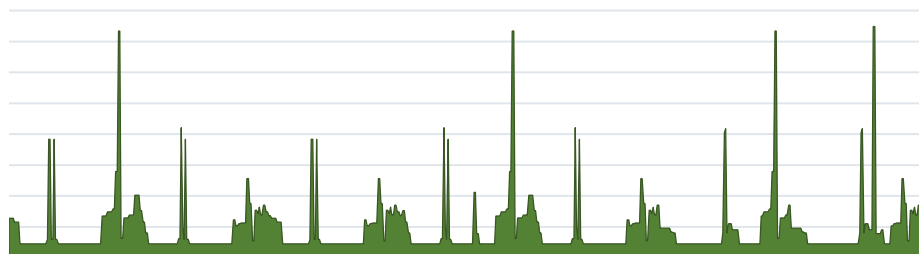


Figura 3.2 - Valores preditivos sem incerteza relativos aos consumos das cargas não controláveis.

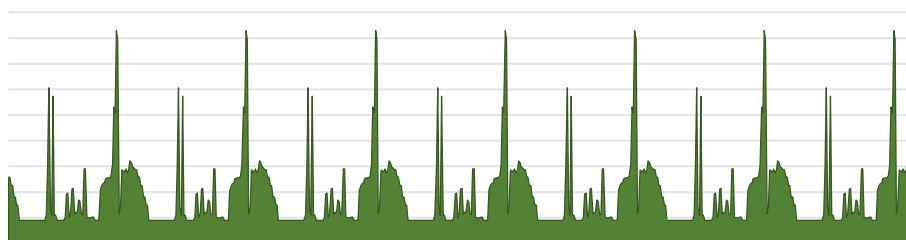


Figura 3.3 - Valores preditivos com incerteza dos consumos das cargas não controláveis.

Tabela 3.5 - Dados relativos às cargas não controláveis.

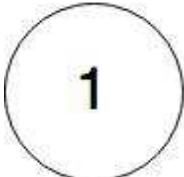
Cargas não controláveis		
Divisão	Carga	Consumos (W)
1 - Cozinha	Frigorífico	100
	Congelador	80
	Fluorescente Tubular	15
	LED (4)	20
	Microondas	1300

	Forno Elétrico	485
	Placa Elétrica	2200
2 - Sala	Televisão - LCD	130
	LED (4)	20
	Fluorescente Tubular	15
3 - Hall	LED(2)	10
	CFL	25
	Televisão - LCD	130
4 - Quarto1	Portátil	50
	LED (2)	10
	CFL	25
5 - Quarto2	Televisão - LCD	130
	Portátil	50
	LED (2)	10
	CFL	25

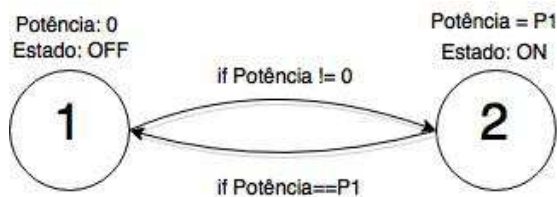
Os valores apresentados dentro de parêntesis representam o número de cargas do tipo correspondente e o valor do consumo representa o valor do agregado de cargas.

O funcionamento dos diferentes tipos de cargas presentes no sistema energético ao nível da habitação doméstica são modelados pelos vários estados de funcionamento associados a cada uma delas. Na tabela 3.6 são apresentados os esquemas de controlo de acordo com o tipo de carga. Cada círculo corresponde a um estado de funcionamento, aos quais é associado um modo de funcionamento (on/off) e uma potência. A transição de estado é devida a condições relacionadas a sinais de entrada, assim como a respetiva permanência no mesmo estado. Relativamente aos estados de funcionamento das cargas controláveis, é assumido que após o fim da duração total de operação as máquinas desligam automaticamente, não existindo assim um estado de *standby* que seria responsável pelo consumo indesejado de uma pequena fração de energia elétrica.

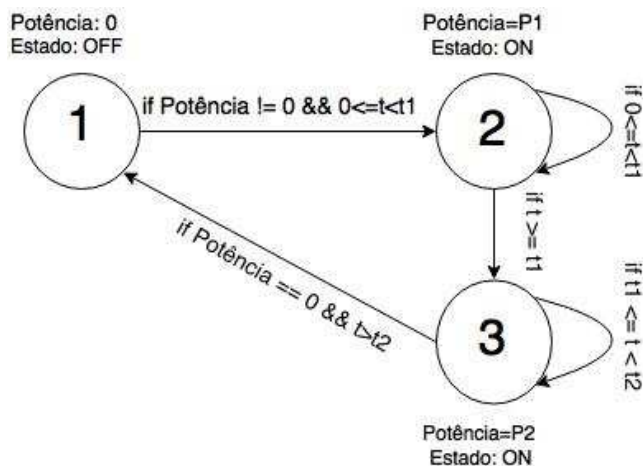
Tabela 3.6 - Esquemas de controlo do funcionamento das cargas controláveis.

Esquemas de controlo	
Tipo de carga	Esquema
1 - Coolers	<p>Potência = P1 Estado: ON</p> 

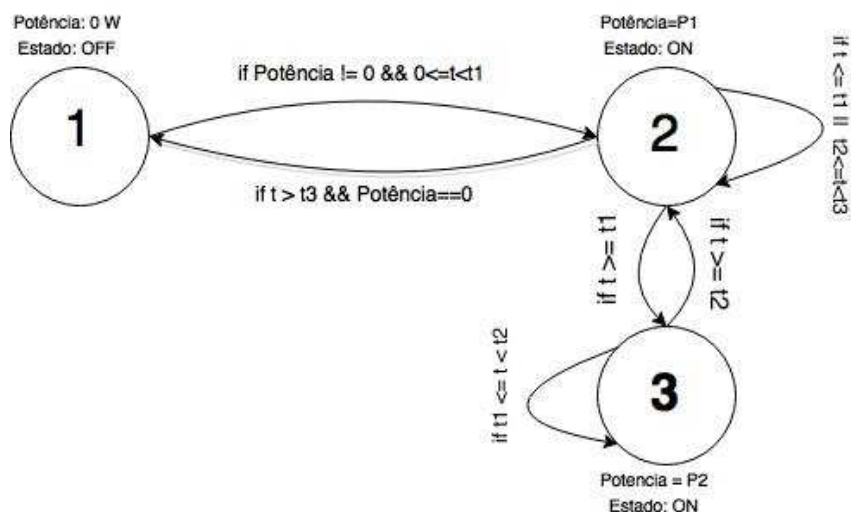
2 - Iluminação e
Equipamentos
(TV/Portátil)



3 - Máquina Lavar
Roupa e Máquina
Secar Roupa



4 - Máquina Lavar
Loiça



Na tabela 3.7. são apresentados os dados relativos aos diferentes intervalos de funcionamento associados às cargas controláveis, os quais são definidos pelo consumidor de acordo com as suas necessidades e condicionam a operação de otimização.

Tabela 3.7 - Dados relativos aos intervalos de funcionamento das cargas controláveis definidos pelo consumidor.

Dados Cargas Controláveis		
	HoraInício	HoraFim
Máquina Lavar Loiça	09:00:00	19:00:00
Máquina Lavar Roupa	10:00:00	14:00:00
Máquina Secar	13:00:00	18:00:00

3.3 Modelização do Sistema Fotovoltaico - Autoconsumo.

O sistema energético de habitação doméstica para além das cargas típicas descritas anteriormente, possui também um sistema de produção local fotovoltaica segundo o regime de autoconsumo. A produção fotovoltaica, dependente da irradiância solar ao longo do dia, é variável. Tal como foi efetuado para as cargas não controláveis, também para os valores relativos à produção fotovoltaica foram adotados dois conjuntos de valores, um relativo a valores preditivos sem incerteza e portanto isentos de qualquer erro de previsão, os quais são representados na figura 3.4., e um conjunto de valores preditivos com incerteza representados na figura 3.5.

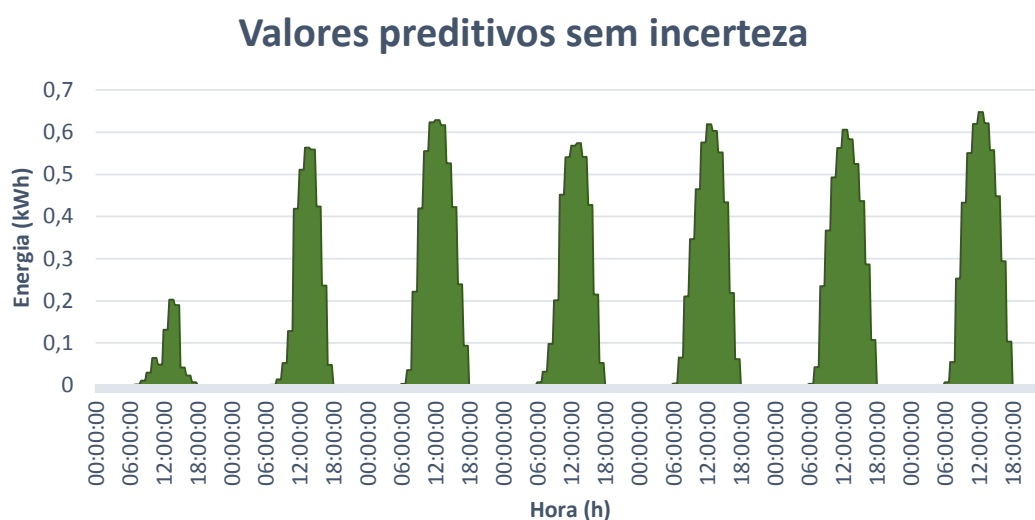


Figura 3.4 - Valores preditivos sem incerteza relativos à produção fotovoltaica.

O objetivo pretendido é maximizar o consumo desta produção fotovoltaica, ou seja, sempre que há necessidades de consumo de carga, estas são preferencialmente e sempre que possível alimentadas a partir da energia produzida pelo sistema fotovoltaico, permitindo assim diminuir o custo associado à fatura energética do consumidor. O excedente de

produção é armazenado no sistema de baterias que será apresentado mais à frente, sempre que a operação se mostrar favorável, podendo ser utilizado mais tarde para alimentar algumas cargas em períodos em que a produção fotovoltaica é nula, de acordo com a otimização implementada no sistema energético de habitação doméstica.

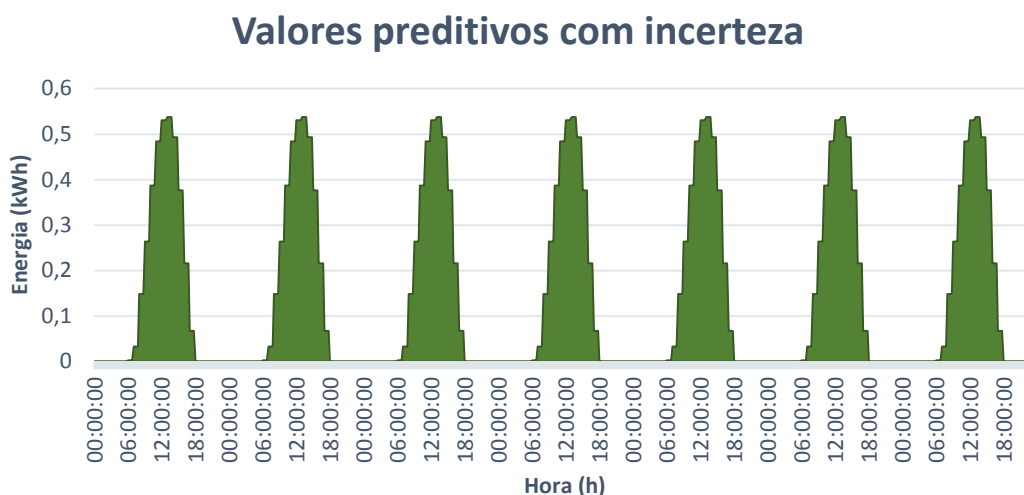


Figura 3.5 - Valores preditivos com incerteza relativos à produção fotovoltaica.

A figura 3.6 representa a interseção entre a base do diagrama dos valores reais dos consumos correspondente às cargas não controláveis e os valores reais da produção fotovoltaica ao longo do período de simulação

A partir da figura 3.6. é possível observar a existência de uma elevada energia injetada líquida, correspondente à área da produção líquida ou injetada líquida. Somente a área correspondente ao consumo fotovoltaico representa o aproveitamento da energia da produção fotovoltaica para alimentação dos consumos referentes às cargas não controláveis. Como foi já referido, um dos objetivos deste trabalho de dissertação, é procurar o aproveitamento da área do excedente fotovoltaico de forma a alimentar os consumos relativos à habitação doméstica e, assim, maximizar o autoconsumo, o que consequentemente leva a que o consumo líquido não aumente consideravelmente, e reduza a faturação energética. O valor total associado à produção fotovoltaica para todo o período de simulação foi de 99,177kWh.

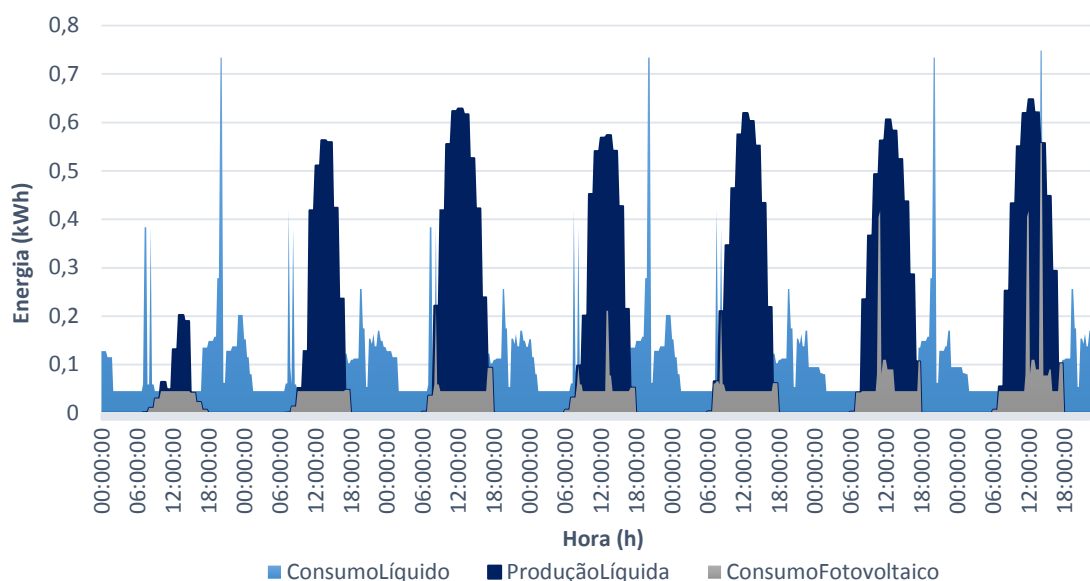



Figura 3.6 - Representação da interseção dos dados reais relativos aos consumos das cargas não controláveis com os dados preditivos sem incerteza relativos à produção fotovoltaica.

3.4 Modelização do Veículo Elétrico.

O Veículo Elétrico é outro componente presente no sistema energético ao nível da habitação doméstica. Através do sistema V2G, o veículo elétrico funciona não só como uma carga nos períodos de tempo em que o mesmo se encontra presente na habitação doméstica, mas também como uma possível fonte de alimentação das cargas presentes ao nível da habitação doméstica, sendo que estes momentos são determinados através da simulação do sistema de otimização de funcionamento desenvolvido. O Veículo Elétrico presente ao nível do sistema energético de habitação doméstica referente ao trabalho de dissertação é o Nissan Leaf cujas características de funcionamento são apresentadas na tabela 3.8. Não são considerados limites máximos e mínimos para o nível de carga da bateria. A variável *State of Charge* (sigla SOC), representa o estado do nível de carga associado à bateria do Veículo Elétrico sendo que SOC(0) representa o nível de carga inicial que se considera como estando descarregada.

Através da ferramenta Microsoft Office Excel foi simulada a operação de carga e descarga da bateria do Veículo Elétrico, sendo que esta foi considerada como sendo linear ao longo do tempo, e a potência de carga e descarga foi considerada com um valor igual ao valor máximo, 6,6 kW. A figura 3.7. representa a evolução do nível de estado de carga referente à simulação da operação de carregamento do sistema de baterias associado ao Veículo elétrico representada por uma função linear. Como é possível verificar, o tempo de carregamento é de aproximadamente três horas e meia

Tabela 3.8 - Dados relativos ao funcionamento do Veículo Elétrico.

Caraterísticas de funcionamento		
Veículo Elétrico	Parâmetro	Valor
	Capacidade (kWh)	24
	Potência des/carga máx. (kW)	6,6
	SOC (0) (%)	0
	Eficiência (Wh/km)	168,44

As necessidades de deslocação do consumidor condicionam o nível do estado de carga do veículo elétrico. Assim, o consumidor é responsável por definir um parâmetro *StartTime (h)* - *FinishTime (h)* que corresponde ao intervalo em que este pretende utilizar o veículo elétrico e portanto, no qual este se encontra fora da habitação doméstica. Este intervalo de tempo varia conforme é dia útil ou fim de semana. De acordo com a eficiência do veículo elétrico, e sabendo que a um nível de estado de carga máximo em que a bateria se encontra completamente carregada corresponde uma autonomia de 135 quilómetros, é possível determinar qual o correspondente nível de estado de carga para um determinado número de quilómetros que o consumidor deseja realizar através da equação (3.5).

$$SOC_{percurs o} = \frac{Eficiência * numerokms}{Capacidade} \quad (3.5)$$

onde, $SOC_{percurso}$ corresponde ao estado de carga associada a uma determinada necessidade de trajeto, Eficiência corresponde ao valor da eficiência de deslocação do veículo elétrico, numerokms corresponde ao número de quilómetros associados ao trajeto que se pretende realiza, Capacidade corresponde ao valor da capacidade associada à bateria do veículo elétrico.

Na tabela 3.9. são apresentados alguns valores do número de quilómetros possíveis de percorrer relativamente a determinados níveis de estado de carga.

Tabela 3.9 - Capacidades associadas a determinadas necessidades de trajeto.

SOC	Quilómetros (km)
0,95	135
0,562963	80
0,351852	50
0,211111	30

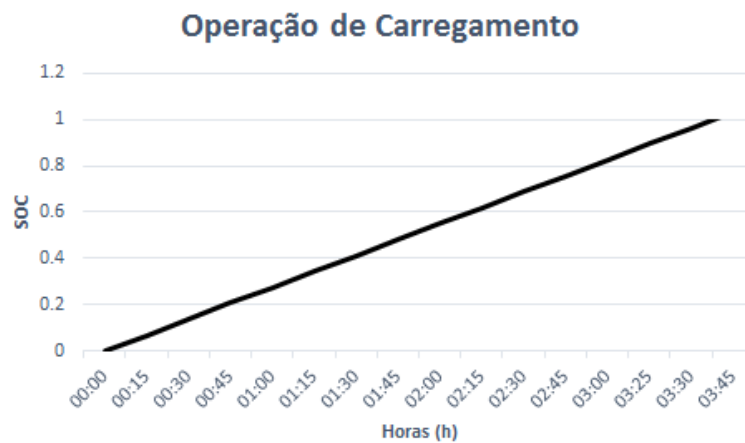


Figura 3.7 - Evolução do estado de carga da bateria durante a operação de carregamento.

Na tabela 3.10. são apresentados os dados relativos às necessidades de trajeto que o consumidor definidos pelo mesmo e que condicionam a otimização da operação do Veículo Elétrico. São também definidos os intervalos de utilização pretendidos por este. Tal como foi já referido os dados variam de acordo com o dia da semana associado, como é possível observar.

Tabela 3.10 - Dados relativos às necessidades de trajeto e de intervalo de utilização definidas pelo consumidor

Dados Veículo Elétrico		
Dia útil	SOCpercurso (80km)	0,562962963
	<i>StartTime</i>	08:00:00
	<i>FinishTime</i>	20:00:00
Sábado	SOCpercurso (50km)	0,351851852
	<i>StartTime</i>	13:30:00
	<i>FinishTime</i>	17:30:00
Domingo	SOCpercurso (30km)	0,211111111
	<i>StartTime</i>	16:00:00
	<i>FinishTime</i>	17:15:00

A modelização do veículo elétrico é então feita de acordo com o seguinte modelo matemático composto pelas equações (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10) e (3.11).

$$SOC_VE[h] = SOC_VE[h-1] + \frac{(Pch_VE[h] - Pdch_VE[h]) * \Delta t}{Capacidade_VE} \quad (3.6)$$

onde $SOC_VE[h]$ corresponde ao estado de carga do veículo elétrico no instante de tempo h , $Pch_VE[h]$ corresponde ao valor da potência de carga do veículo elétrico no instante de tempo h , $Pdch_VE[h]$ corresponde ao valor da potência de descarga do veículo elétrico no instante de tempo h , $Capacidade_VE$ corresponde à capacidade da bateria associada ao Veículo Elétrico, Δt corresponde ao intervalo de tempo, sendo que o seu comportamento é sujeito às seguintes restrições:

- Restrições de limites:

$$0 \leq SOC_VE[h] \leq 1, \forall h \in Ntotalhora \quad (3.7)$$

$$0 \leq Pch_VE[h] \leq 6,6, \forall h \in Ntotalhora \quad (3.8)$$

$$0 \leq Pdch_VE[h] \leq 6,6, \forall h \in Ntotalhora \quad (3.9)$$

- Restrições de intervalo fora da habitação doméstica:

$$SOC_VE[h] \geq SOC_{percurso}, \forall h = StartTime \quad (3.10)$$

$$SOC_VE[h = FinishTime] = SOC_VE[h = StartTime] - SOC_{percurso} \quad (3.11)$$


Segundo a equação (3.7) é imposta a condição de que o estado de carga da bateria pode variar entre o estado de carga completa e o estado de carga nula para todos os intervalos de tempo h . As equações (3.8) e (3.9) limitam os valores das potências de carga e descarga os quais têm de ser sempre inferiores ao valor máximo admissível. Por outro lado, a equação (3.10) impõe a necessidade de o estado de carga no veículo elétrico no instante de tempo definido pelo consumidor como o instante de saída do veículo elétrico da habitação doméstica ($SOC_VE[h=StartTime]$) ser igual ou superior às necessidades de deslocação definidas pelo utilizado ($SOC_{percurso}$). Já a equação (3.11) garante que o estado de carga no instante de tempo definido pelo consumidor como o instante de chegada do veículo elétrico à habitação doméstica ($SOC_VE[h=FinishTime]$) tem que ser igual ao estado de carga verificado após a sua saída ($SOC_VE[h=StartTime]$) menos as necessidades de trajeto já satisfeitas ($SOC_{percurso}$). De notar que apenas uma operação (carga ou descarga) pode ser efetuado num determinado intervalo de tempo.

3.4 Modelização do Sistema de Armazenamento por Baterias.

De modo a otimizar a utilização do sistema de produção fotovoltaico, assim como a fatura associado ao consumo de energia elétrica, é utilizado um sistema de armazenamento por baterias implementado no sistema energético ao nível da habitação doméstica. Para o efeito é utilizado um sistema de baterias da Bosch cujas características de funcionamento são

apresentadas na tabela 3.11. No caso do sistema de armazenamento por baterias assume-se que SOC (0) encontra-se a meia carga.

Tabela 3.11 - Dados relativos ao funcionamento do sistema de armazenamento por baterias.

Caraterísticas de funcionamento		
Bateria	Parâmetro	Valor
	Capacidade (kWh)	8,8
	Potência des/carga máx. (kW)	5
	SOC (0) (%)	50

Através da ferramenta Microsoft Office Excel foi também para o sistema de baterias simulada a operação de carga e descarga, sendo que mais uma vez esta foi considerada como sendo linear ao longo do tempo, e a potência de carga e descarga foi considerada com um valor igual ao valor máximo, 5 kW. A figura 3.8. representa a evolução do nível de estado de carga referente à simulação da operação de carregamento do sistema de armazenamento por baterias representada por uma função linear. O tempo de carregamento de acordo com as caraterísticas admitidas para esta operação de carga, é ligeiramente superior a duas horas e meia.

A modelização das baterias é feita de acordo com o seguinte modelo matemático composto pelas equações (3.12), (3.13), (3.14) e (3.15).

$$SOC_Bat[h] = SOC_Bat[h-1] + \frac{(Pch_Bat[h] - Pdch_Bat[h]) * \Delta t}{Capacidade_Bat} \quad (3.12)$$

onde SOC_Bat[h] corresponde ao estado de carga da bateria associada ao sistema de armazenamento no instante de tempo h, Pch_Bat[h] corresponde ao valor da potência de carga da bateria no instante de tempo h, Pdch_Ve[h] corresponde ao valor da potência de descarga da bateria no instante de tempo h, Capacidade_VE corresponde à capacidade do sistema de armazenamento por baterias, Δt corresponde ao intervalo de tempo, sendo que o seu comportamento é sujeito às seguintes restrições:

- Restrições de limites:

$$0 \leq SOC_Bat[h] \leq 1, \forall h \in Ntotalhora \quad s \quad (3.13)$$

$$0 \leq Pch_Bat[h] \leq 5, \forall h \in Ntotalhora \quad s \quad (3.14)$$

$$0 \leq P_{dch_Bat}[h] \leq 5, \forall h \in N_{totalhora} \quad (3.15)$$

onde os valores de P_{ch_Bat} e P_{dch_Bat} correspondem aos respectivos valores de potência que a bateria está a armazenar e a fornecer respetivamente, os quais condicionam o nível do estado de carga da mesma ao longo dos diferentes períodos de tempo (SOC_{Bat}). Tal como no caso da bateria associada ao veículo elétrico estes valores estão condicionados pela potência máxima, a qual é idêntica aos dois e não pode ser ultrapassada. Também neste caso apenas uma operação pode ser verificada para o mesmo instante de tempo.

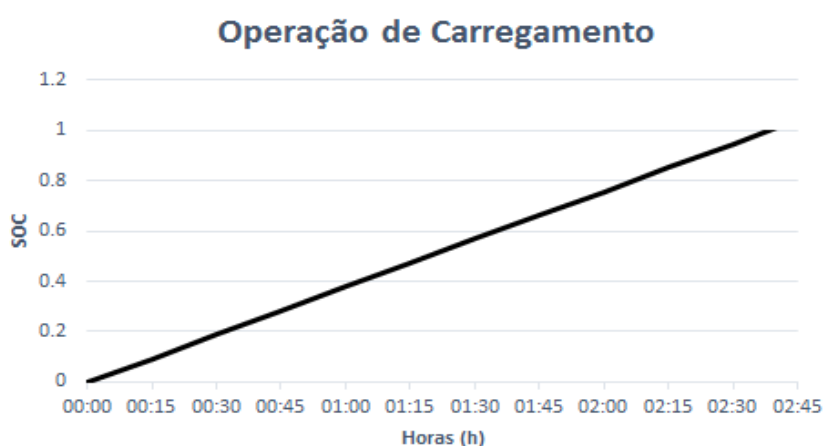


Figura 3.8 - Evolução do estado de carga do sistema de armazenamento por baterias durante a operação de carregamento.

3.5 Modelização da Bomba de Calor.

Ao nível de uma habitação doméstica, uma das maiores parcelas correspondentes aos consumos de energia elétrica é relativa a necessidades de aquecimento e de arrefecimento. Desta forma, o trabalho de dissertação considera a existência de uma bomba de calor de forma a assegurar o conforto a nível de climatização e aquecimento de águas sanitárias para o consumidor. Na tabela 3.12 são apresentadas as características relativas à bomba de calor adotada. Tal como é possível observar na mesma, a bomba de calor apresenta dois modos de funcionamento cujos princípios serão abordados mais adiante. Para cada um dos modos de funcionamento, a bomba de calor apresenta o parâmetro de eficiência de desempenho, COP, que tal como já foi referido representa o quociente entre a energia térmica fornecida e a energia elétrica consumida. As características desta grandeza em função da temperatura exterior e relativamente a um dado valor de temperatura do fluido, são representadas na figura 3.8.e na figura 3.9. para cada um dos diferentes modos de funcionamento respetivamente.

Tabela 3.12 - Dados relativos ao funcionamento da Bomba de Calor.

Caraterísticas de funcionamento			
Bomba de Calor	Modo Funcionamento	Parâmetro	Valor
 Platinum BC V200	Modo Aquecimento	Pot. Aquecimento (kW)	10,87
		Pot. Elétrica (kW)	2,57
		COP	4,2
		Temp. exterior (°C)	7
		Temp. Líquido (°C)	35
	Modo Arrefecimento	Pot. Arrefecimento (kW)	9,61
		Pot. Elétrica (kW)	2,1
		COP	4,5
		Temp. exterior (°C)	35
		Temp. Líquido (°C)	18

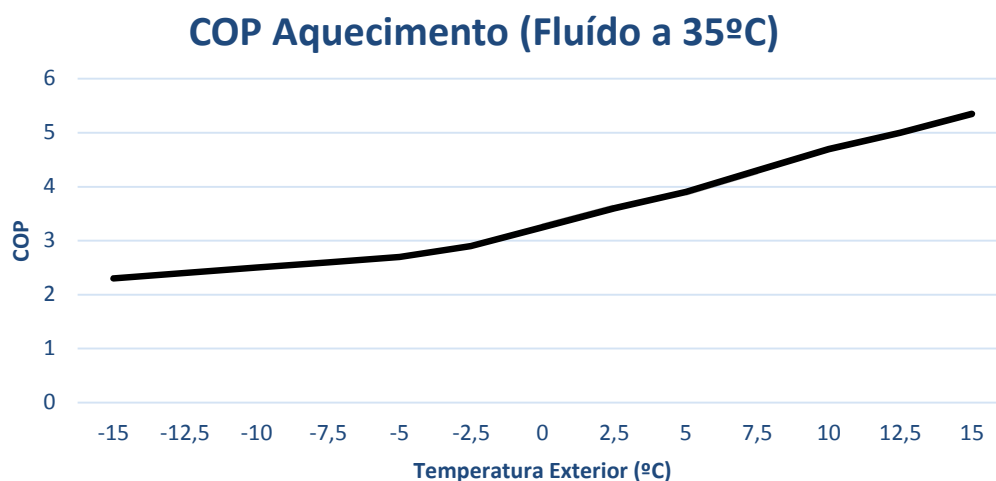


Figura 3.9 - Caraterística do COP no modo de Aquecimento.

Através das figuras anteriormente representadas, foi possível retirar a expressão relativa à função que descreve a evolução do coeficiente COP em função da temperatura exterior, dada pela equação (3.16) relativamente ao modo de aquecimento e pela equação (3.17) relativamente ao modo de arrefecimento.

$$COP[h] = 3,359 * e^{(0,0302 * Temp_Ext[h])}, \forall h \in N_{totalhoras} \quad (3.16)$$

$$COP[h] = -0,0827 * Temp_Ext[h] + 6,2744, \forall h \in N_{totalhoras} \quad (3.17)$$

onde, $Temp_ext[h]$ corresponde ao valor da temperatura exterior no intervalo de tempo h .

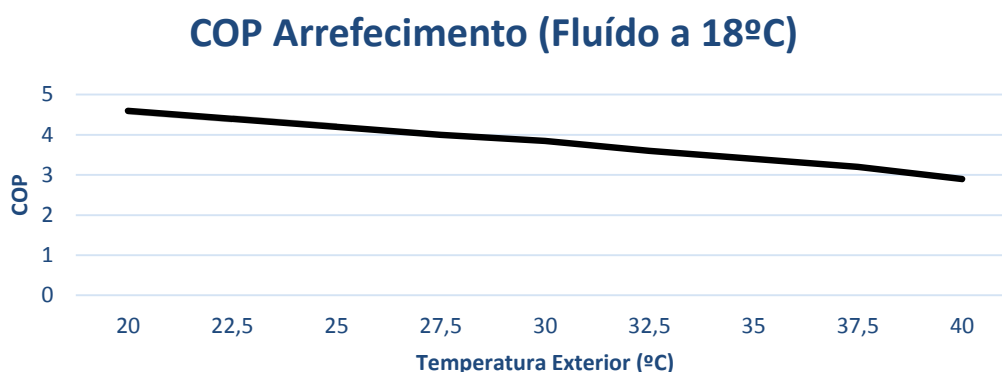


Figura 3.10 - Caraterística do COP no modo de Arrefecimento.

No modo de aquecimento, o comportamento do coeficiente COP foi modelizado por uma aproximação exponencial, enquanto que no modo de arrefecimento o mesmo foi modelizado por uma aproximação linear.

Relativamente aos dados correspondentes à temperatura exterior, tal como foi efetuado para os consumos das cargas não controláveis e para a produção fotovoltaica, foram assumidos também dois conjuntos de dados, um relativo a valores prreditivos sem incerteza os quais são ilustrados na figura 3.11. e outro relativo a valores prreditivos com incerteza, sendo estes ilustrados na figura 3.12.



Figura 3.11 - Valores prreditivos sem incerteza relativos à temperatura exterior.

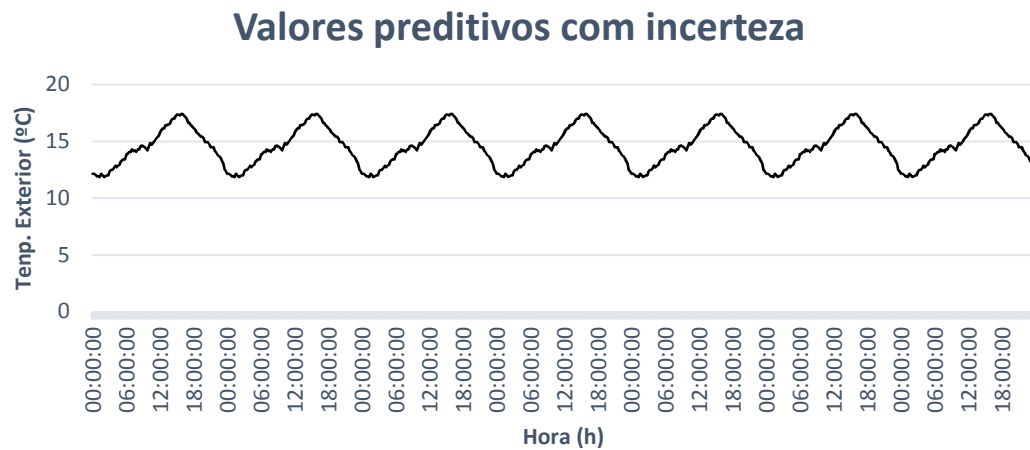


Figura 3.12 - Valores preditivos com incerteza relativos à temperatura exterior.

Relativamente à potência calorífica e à potência de arrefecimento, as suas características relativamente à bomba de calor adotada são ilustradas nas figuras 3.13. e 3.14, respetivamente. De notar que as mesmas são relativas a um determinado valor de temperatura do fluido.

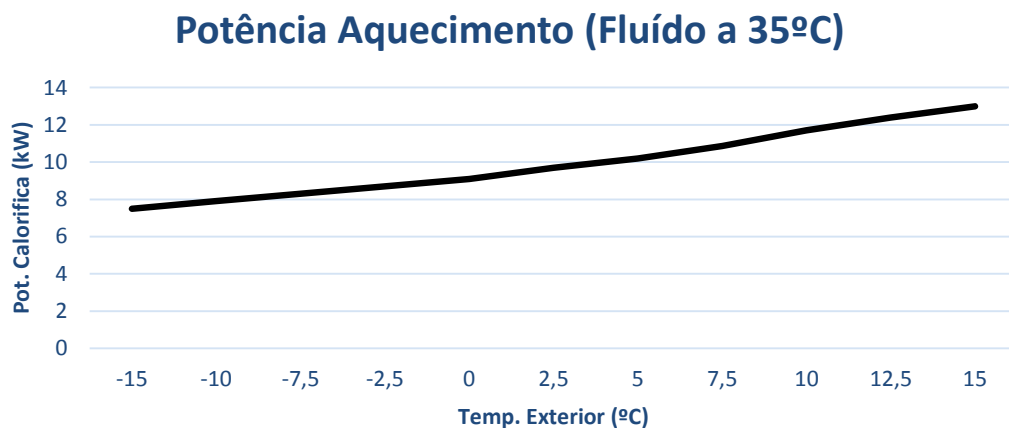


Figura 3.13 - Característica da Potência Aquecimento.

As funções que modelizam os valores da potência de aquecimento e da potência de arrefecimento são representadas pela equação (3.18) para o modo de aquecimento e pela equação (3.19) para o modo de arrefecimento.

$$Pot_{\text{Aquecimento}}[h] = 9,4963 * e^{(0,019 * Temp_{\text{Ext}}[h])}, \forall h \in N_{\text{totalhora}} \quad (3.18)$$

$$Pot_{\text{Arrefecimento}}[h] = -0,0817 * Temp_{\text{Ext}}[h] + 13,867, \forall h \in N_{\text{totalhora}} \quad (3.19)$$

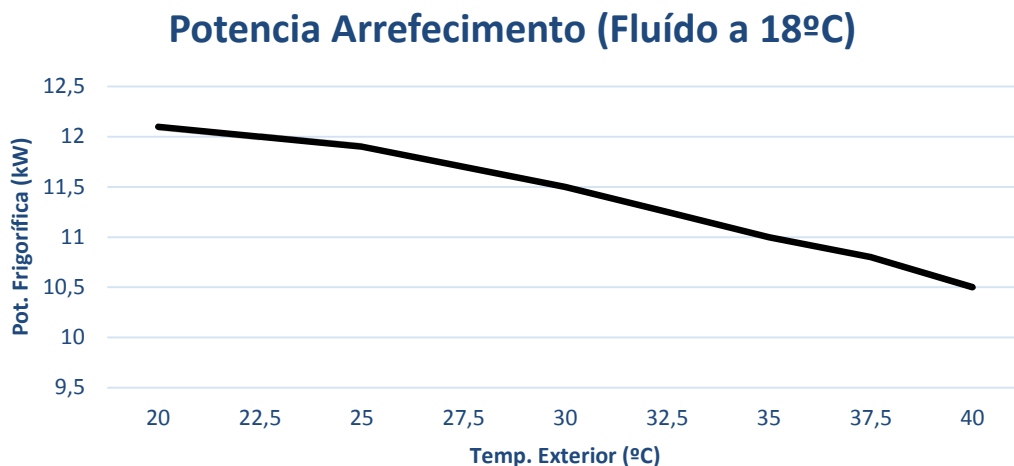


Figura 3.14 - Caraterística da Potência de Arrefecimento.

Assim, o consumo de energia elétrica relativo à tecnologia da bomba de calor nos dois modos de funcionamento é obtido através das equações (3.20) e (3.21).

$$Pot_Elétrica[h] = \frac{Pot_Aquecimento[h]}{COP[h]}, \forall h \in Ntotalhoras \quad (3.20)$$

$$Pot_Elétrica[h] = \frac{Pot_Arrefecimento[h]}{COP[h]}, \forall h \in Ntotalhoras \quad (3.21)$$

Relativamente ao funcionamento da bomba de calor, este é determinado pelo valor da variável $Temp_Int[h]$, que corresponde ao valor da temperatura no interior da habitação doméstica nos diferentes intervalos de tempo h , o qual é sujeito à restrição imposta pela equação (3.22).

$$Tmin \leq Temp_Int[h] \leq Tmax, \forall h \in Ntotalhoras \quad (3.22)$$

onde, $Tmin$ corresponde ao valor mínimo para a temperatura interior da habitação doméstica admitido pelo funcionamento da bomba de calor (17°C), $Tmax$ corresponde ao valor máximo para a temperatura interior da habitação doméstica admitido pelo funcionamento da bomba de calor (24°C).

Assim, quando a temperatura interior atinge o valor de $Tmin$, a bomba de calor inicia o seu funcionamento no modo de aquecimento de forma a repor a temperatura interior com um valor superior a $Tmin$. Se por outro lado a temperatura interior aumentar de tal modo que atinja o valor de $Tmax$ a bomba de calor inicia o seu funcionamento no modo de arrefecimento, até o valor da temperatura interior ser inferior ao mesmo.

O sistema térmico da habitação é modelizado pela equação (3.23).

$$C_{eff} * \frac{dTemp_{Int}[h]}{dt} = Q_{sistema}[h] + Q_{perdas}[h], \forall h \in N_{totalhora} \quad (3.23)$$

onde, C_{eff} corresponde ao coeficiente relativo à capacidade térmica da habitação doméstica, tendo sido admitido para esta variável um valor constante de 1,005 kJ/(kg.°C), $\frac{dTemp_{Int}}{dt}$ corresponde à variação da temperatura interior da habitação doméstica, $Q_{sistema}[h]$ (kW) corresponde à transferência térmica do sistema, ou seja, a energia térmica injetada na habitação doméstica através da tecnologia da bomba de calor, $Q_{perdas}[h]$ (kW) corresponde à taxa de perdas totais da habitação doméstica.

A taxa de perdas totais da habitação doméstica foi admitido como sendo dada pela equação (3.24).

$$Q_{perdas}[h] = (Temp_{Int}[h] - Temp_{Ext}[h]) * Fator, \forall h \in N_{totalhora} \quad (3.24)$$

onde $Fator$ corresponde ao valor referente ao coeficiente de isolamento térmico por hora, o qual foi admitido como sendo 0.1, ou seja, a taxa de perdas totais da habitação doméstica é definida como sendo igual a 10% da variação da temperatura interior e exterior.

Relativamente ao valor da transferência térmica do sistema, este é dado pela equação (3.25).

$$Q_{sistema}[h] = \frac{Potencia}{4}, \forall h \in N_{totalhora} \quad (3.25)$$

sendo que no modo de aquecimento, $Potência$ toma o valor da $Pot_{Aquecimento}[h]$, enquanto que no modo de arrefecimento $Potência$ toma o valor da $Pot_{Arrefecimento}[h]$.

Relativamente ao consumo da bomba de calor para fins de aquecimento de águas quentes sanitários é admitido um valor de consumo igual a 0,2 kWh por pessoa. Os intervalos em que este consumo se verifica são decididos pelas necessidades do consumidor como se verá mais à frente.

Ainda relativamente à operação da Bomba de Calor, é ilustrado na tabela 3.13 os dados relativos às necessidades do consumidor de modo a ser alcançada a sua satisfação.

Conforme o dia da semana em que nos encontramos (dia útil ou fim de semana), são definidos períodos de necessidade de água quente sanitária para banhos, assim como dois períodos em que o consumidor pretende que a temperatura interior da sua habitação esteja a uma determinada temperatura ($HoraManhã$ e $HoraTarde$) definida pelo mesmo (T_{set}).

Tabela 3.13 - Dados relativos às necessidades definidas pelo consumidor.

Dados Bomba Calor		
Dia útil		07:00:00
	Horas Água (h)	07:30:00
		08:00:00
	Hora Manhã (h)	07:00:00
	Hora Tarde (h)	20:00:00
Tset (°C)		20
Fim de Semana		11:00:00
	Horas Água (h)	11:30:00
		12:30:00
	Hora Manhã	11:00:00
	Hora Tarde	18:00:00
Tset (°C)		20

Capítulo 4

Algoritmo referente ao sistema de otimização

Neste capítulo é apresentada a formulação matemática relativa ao problema do sistema de otimização implementado, sendo também feita uma descrição referente ao algoritmo desenvolvido para o sistema de otimização. Por fim são descritos os diferentes cenários que foram elaborados no sentido de possibilitar uma análise comparativa e consequente avaliação do funcionamento do sistema de otimização desenvolvido.

4.1 Modelo matemático.

O problema abordado no trabalho de dissertação é relativo à otimização de operação do sistema energético de habitação doméstica, cuja modelização foi apresentada no capítulo anterior. Esta otimização consiste na procura dos períodos ótimos de funcionamento dos diferentes componentes de forma a minimizar o custo associado à fatura energética dos consumos das mesmas, ou seja, o objetivo é otimizar o agendamento das diversas operações de funcionamento associadas aos diversos componentes controláveis presentes ao nível da habitação doméstica. Para tal foi realizada uma otimização matemática de *scheduling* recorrendo à linguagem de programação VBA com recurso à ferramenta Microsoft Office Excel.

Os índices utilizados nas diferentes variáveis ao longo do código da simulação foram os seguintes:

- i - Representa o número de máquinas controláveis.
- j - Representa o número de ciclos de funcionamento associados às máquinas controláveis.

- h - Representa o número de instantes de tempo para cada dia. Uma vez que as 24 horas são divididas em intervalos de 15 minutos, este toma o valor de 96.
- k - Representa o número correspondente aos diferentes dias, variando de 1 a 7.

A simulação adotada é, tal como foi já referido, condicionada por dados introduzidos pelo consumidor de modo a satisfazer as suas necessidades, e que condicionam algumas variáveis relativos aos componentes tecnológicos da habitação doméstica, tal como será visto mais à frente.

O problema de otimização implementado tem a seguinte formulação matemática composta pelas equações (4.1) a (4.20).

Função Objetivo:

$$\min \sum_{k=1}^{Ntotaldias} \sum_{h=1}^{Ntotalhoras} Custo[h] - Remuneração[h] \quad (4.1)$$

Sujeito a:

- Restrições referentes à Bomba de Calor:

$$T_{min} \leq Temp_Int[h] \leq T_{max}, \forall h \in Ntotalhoras \quad (4.2)$$

$$Temp_Int[h] = T_{set}, \forall h = HoraManha \quad (4.3)$$

$$Temp_Int[h] = T_{set}, \forall h = HoraTarde \quad (4.4)$$

$$0 \leq Q_{sistema}[h] \leq \frac{Potência}{4}, \forall h \in Ntotalhoras \quad (4.5)$$

- Restrições referentes às cargas controláveis:

$$Início[i] + DuraçãoTotal[i] \leq HoraFim[i], \forall i \in NTotalMaquinas \quad (4.6)$$

$$Início[i] \geq HoraInício[i], \forall i \in NTotalMaquinas \quad (4.7)$$

$$Potência[i][h] \geq 0, \forall i \in NTotalMaquinas, \forall h \in Ntotalhoras \quad (4.8)$$

$$Potência[i][h] = 0, \forall h < HoraInício[i] \quad (4.9)$$

$$Potência[i][h] = 0, \forall h \geq HoraFim[i] \quad (4.10)$$

- Restrições referentes ao Veículo Elétrico:

$$0 \leq SOC_VE[h] \leq 1, \forall h \in Ntotalhora \quad s \quad (4.11)$$

$$0 \leq Pch_VE[h] \leq Pch_max_VE, \forall h \in Ntotalhora \quad s \quad (4.12)$$

$$0 \leq Pdch_VE[h] \leq Pdch_max_VE, \forall h \in Ntotalhora \quad s \quad (4.13)$$

$$Pch_VE[h] = 0, \forall StartTime \leq h \leq FinishTime \quad (4.14)$$

$$Pdch_VE[h] = 0, \forall StartTime \leq h \leq FinishTime \quad (4.15)$$

$$SOC_VE[h] \geq SOCpercurs o, \forall h = StartTime \quad (4.16)$$

$$SOC_VE[h = FinishTime] = SOC_VE[h = StartTime] - SOCpercurs o \quad (4.17)$$

- Restrições relativas ao sistema de armazenamento por baterias

$$0 \leq SOC_Bat[h] \leq 1, \forall h \in Ntotalhora \quad s \quad (4.18)$$

$$0 \leq Pch_Bat[h] \leq Pch_max_Bat, \forall h \in Ntotalhora \quad s \quad (4.19)$$

$$0 \leq Pdch_Bat[h] \leq Pdch_max_Bat, \forall h \in Ntotalhora \quad s \quad (4.20)$$

4.2 Descrição do algoritmo implementado no sistema de otimização.

O comportamento do sistema de otimização implementado é de seguida apresentado na figura 4.1 que representa o fluxograma relativo ao seu funcionamento. Para cada dia, são executados os diferentes blocos representados pela ordem em que aparecem.

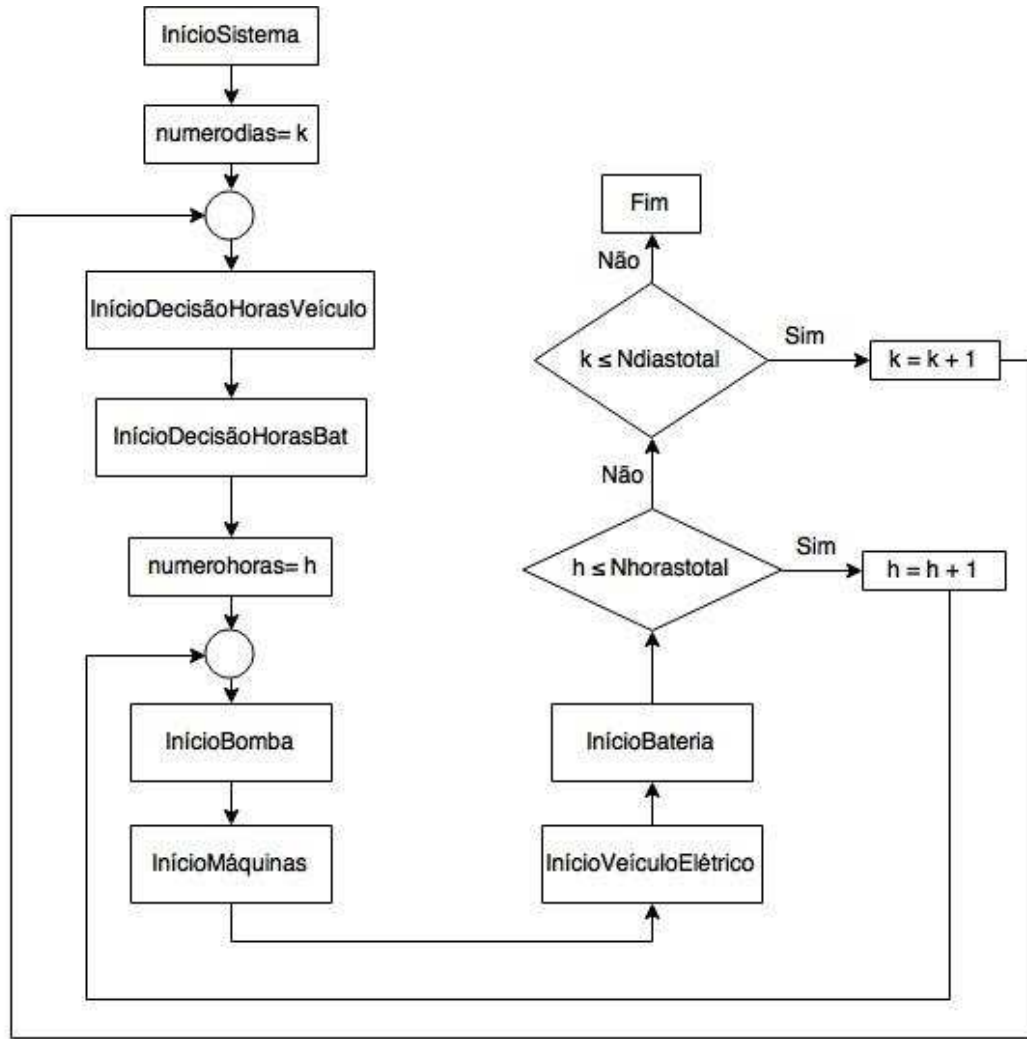


Figura 4.1 - Fluxograma referente à operação de funcionamento do sistema de otimização.

Inicialmente é executado o bloco referente à decisão das horas de carga e descarga do veículo elétrico (InícioDecisãoVeículoElétrico), sendo que o fluxograma referente ao seu comportamento é ilustrado na figura 4.2.

Para esta ação de decisão foi adotada uma heurística baseada no cálculo do Custo Marginal, dado pela equação (4.21).

$$CustoMarginal[h] = \frac{\Delta \epsilon[h]}{\Delta kWh[h]} \quad (4.21)$$

onde, $\Delta \epsilon[h]$ representa o custo associado ao consumo de ΔkWh no período h ., $\Delta kWh[h]$ representa o acréscimo introduzido pelo consumo relativo ao veículo elétrico no período h . Desta forma é avaliado o impacto a nível de custo que representa um consumo extra referente à potência máxima permitida no instante de tempo h .

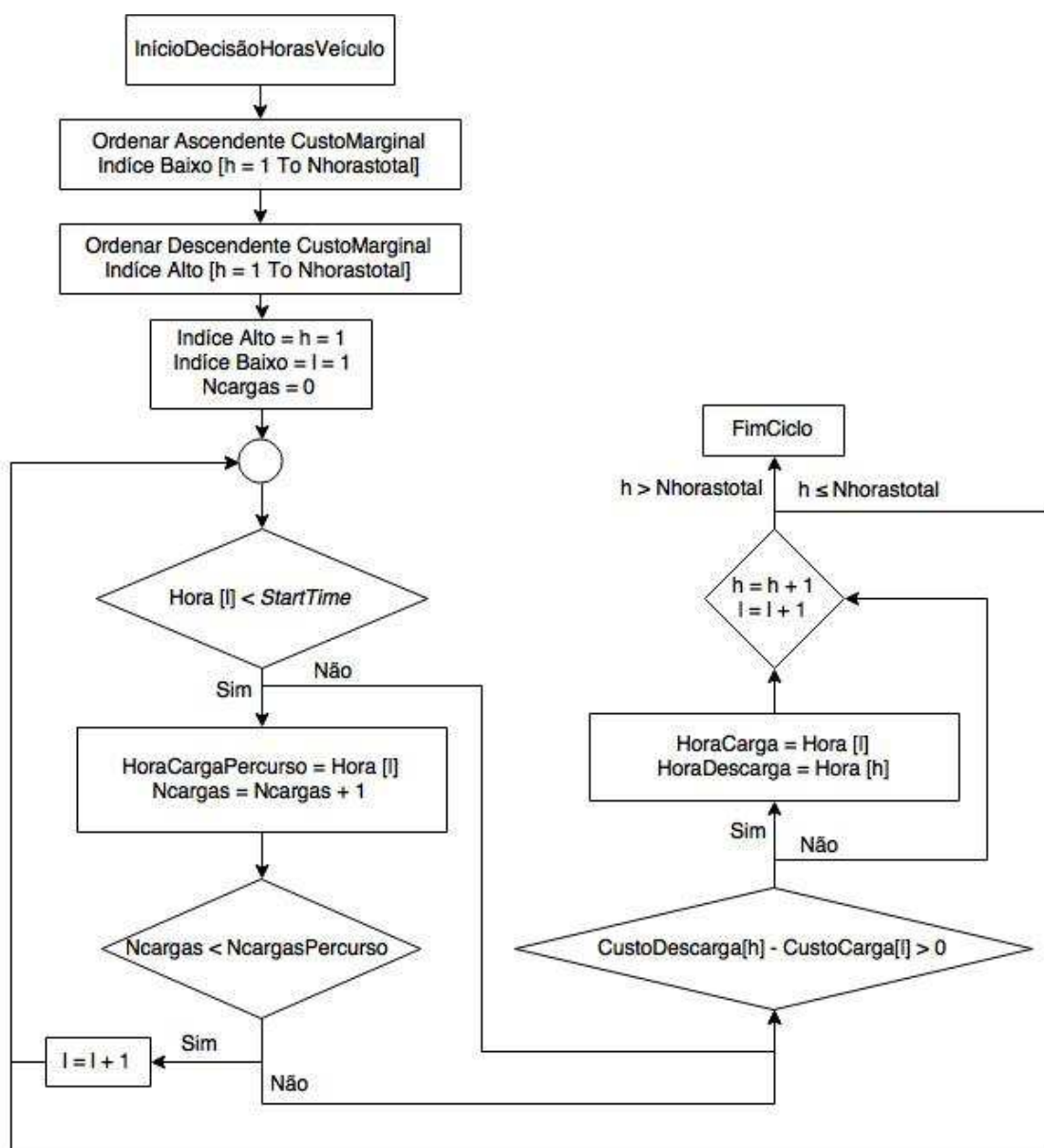


Figura 4.2 - Fluxograma referente à operação de decisão das horas de carga e descarga relativas ao Veículo Elétrico.

Os valores de Custo Marginal obtidos para os diferentes períodos foram de seguida ordenados ascendentemente e descendentemente, permitindo assim analisar qual a vantagem a nível de custo de realizar uma operação de descarga num período caro relativamente à operação de carga num período barato. Esta análise é validada até que a diferença de custo seja igual ou inferior a zero, sendo assim encontrados os períodos mais favoráveis para as operações referidas. De notar que os primeiros períodos de carga mais baratos são utilizados para a operação de carga a fim de colmatar as necessidades de percurso para o dia em questão ($N_{cargasPercurso}$), os quais têm de ser obrigatoriamente inferiores ao período em que o veículo elétrico abandona a habitação doméstica. Após encontrar estes períodos são então procurados os períodos de operação de carga e descarga

favoráveis. Os períodos de carga e descarga encontrados são posteriormente afetados por restrições de capacidade de bateria, aquando da operação de funcionamento do Veículo Elétrico, assim como pelo facto de o veículo elétrico se encontrar ou não na habitação doméstica como será visto mais à frente.

Esta análise efetuada é aplicada também ao sistema de armazenamento por baterias, havendo contudo uma diferença relativa ao facto de neste não ser necessário efetuar a procura de períodos de forma a colmatar as necessidades de percurso. A figura 4.3. ilustra o funcionamento associado à operação de decisão dos períodos de carga e descarga relativos ao sistema de armazenamento por baterias.

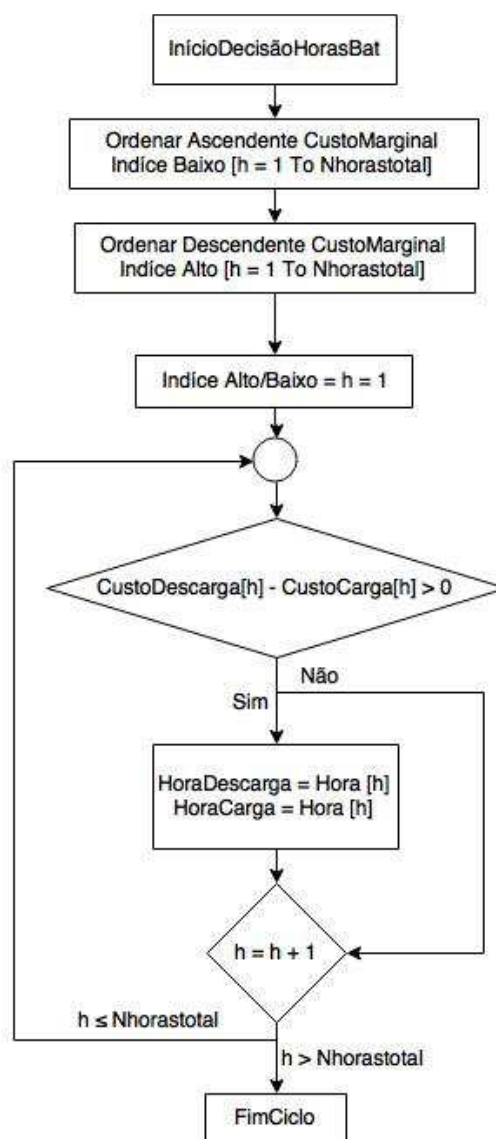


Figura 4.3 - Fluxograma referente à operação de decisão das horas de carga e descarga do sistema de armazenamento por baterias.

De seguida iniciam-se as operações dos diferentes componentes relativos ao sistema energético de habitação doméstica relativa ao trabalho de dissertação, sendo que o primeiro

a operar é a bomba de calor. Uma vez que a mesma não possui capacidade de armazenamento de calor, é considerada uma carga prioritária, tal como as cargas não controláveis. O seu comportamento é apresentado no fluxograma relativo à figura 4.4.

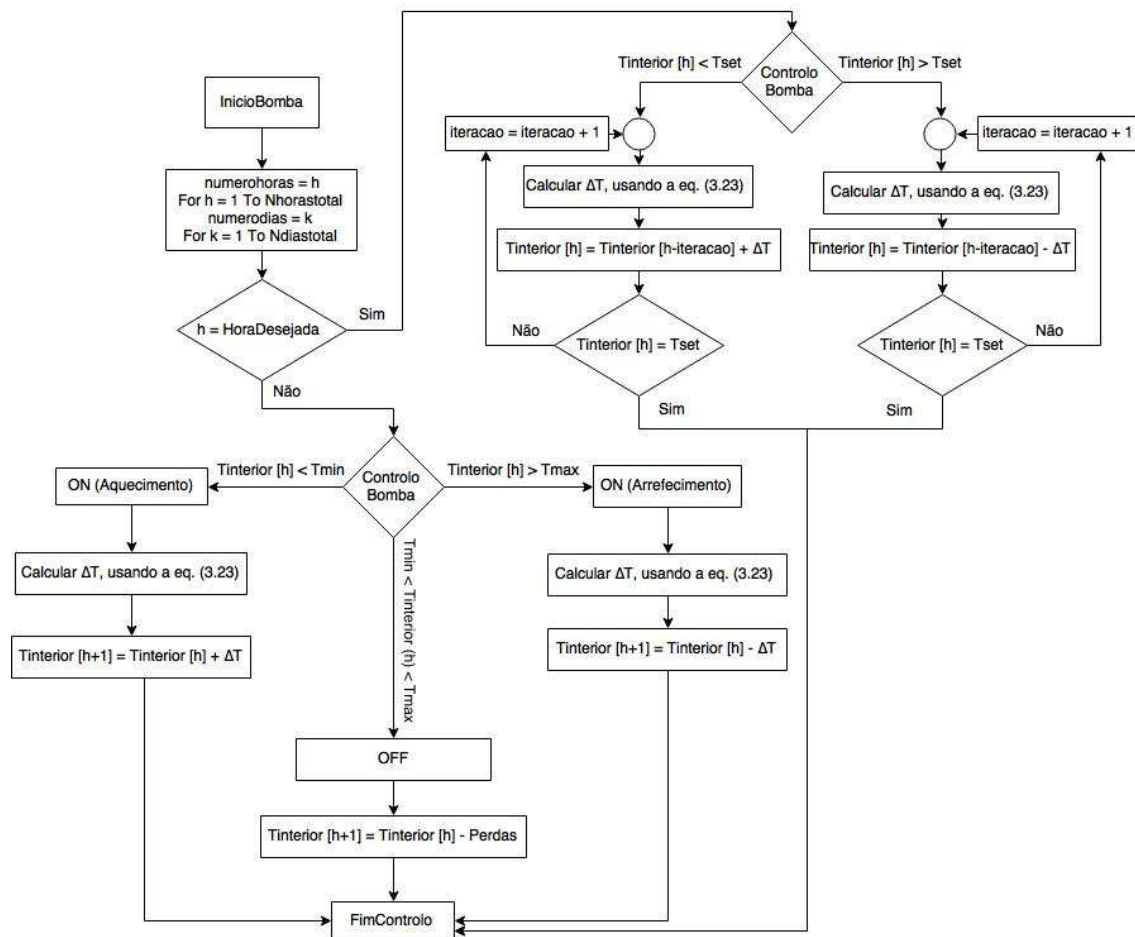


Figura 4.4 - Fluxograma referente à operação de funcionamento da Bomba de Calor.

Relativamente a este, foram abordados dois modos de operação distintos. Num primeiro foi considerado que uma vez que a temperatura interior da habitação doméstica desce abaixo da temperatura mínima admissível, o sistema liga durante um período de tempo, elevando a mesma e de seguida o sistema desliga. Numa segunda abordagem, foi considerado que uma vez que a temperatura interior da habitação doméstica desce abaixo da temperatura mínima admissível, o sistema liga e assim permanece até que a temperatura interior da habitação seja igual à temperatura definida pelo consumidor como temperatura desejada (T_{set}). Das duas análises, verificou-se um menor custo de operação aquando da adoção da primeira abordagem, pelo que esta foi implementada no nosso sistema de otimização.

De forma a satisfazer as necessidades de temperatura definidas pelo consumidor e assim permitir a sua satisfação, é verificado no instante inicial da simulação quais as necessidades referentes ao número de períodos requeridos para o funcionamento da bomba de calor que antecedem o período definido pelo consumidor, assim como a quantidade de potência que a

bomba de calor terá de injetar no sistema de forma a elevar ou diminuir a temperatura conforme a mesma a que se encontra a habitação doméstica nesse instante, valor este calculado pelo sistema de acordo com os dados fornecidos.

De seguida à operação da bomba de calor, é efetuada a operação de funcionamento das cargas controláveis, cujo princípio de operação é representado no fluxograma da figura 4.5. O objetivo consiste em encontrar o período ótimo de funcionamento das três cargas consideradas (Máquina Lavar Loiça, Máquina Lavar Roupa e Máquina de Secar) de forma a minimizar o custo da sua operação, sendo que este é menor nos períodos em que a operação da máquina consiga colmatar as suas necessidades de energia maioritariamente através do sistema de autoconsumo ao qual está associado um custo nulo. Esta ação é condicionada pelos intervalos de operação de funcionamento especificados pelo consumidor os quais foram já anteriormente ilustrados.

Relativamente à operação de funcionamento das cargas controláveis foram também adotadas duas abordagens distintas. Inicialmente a abordagem adotada consistia na procura do período ótimo de funcionamento para a primeira máquina dentro do período especificado pelo consumidor, o qual encontrado era fixado e, consequentemente, condicionava a solução referente à operação das restantes máquinas. O processo era efetuado para as restantes máquinas sendo que a ordem de entrada das máquinas adotada foi aleatória. O que se verificou foi que esta abordagem adotada não considerava casos de operação conjunta que podiam ser bem melhores a nível de custo de operação daquele que foi encontrado como solução ótima.

Nesse sentido foi adotada outra abordagem em que são verificadas todas as combinações possíveis de operação conjunta das três cargas de acordo com as restrições impostas. Com esta abordagem, apesar de o tempo de processamento ser superior, conseguiu-se encontrar uma combinação de operação com um custo associado melhor relativamente ao encontrado na abordagem anterior, pelo que foi esta abordagem de funcionamento implementada no sistema de otimização desenvolvido.

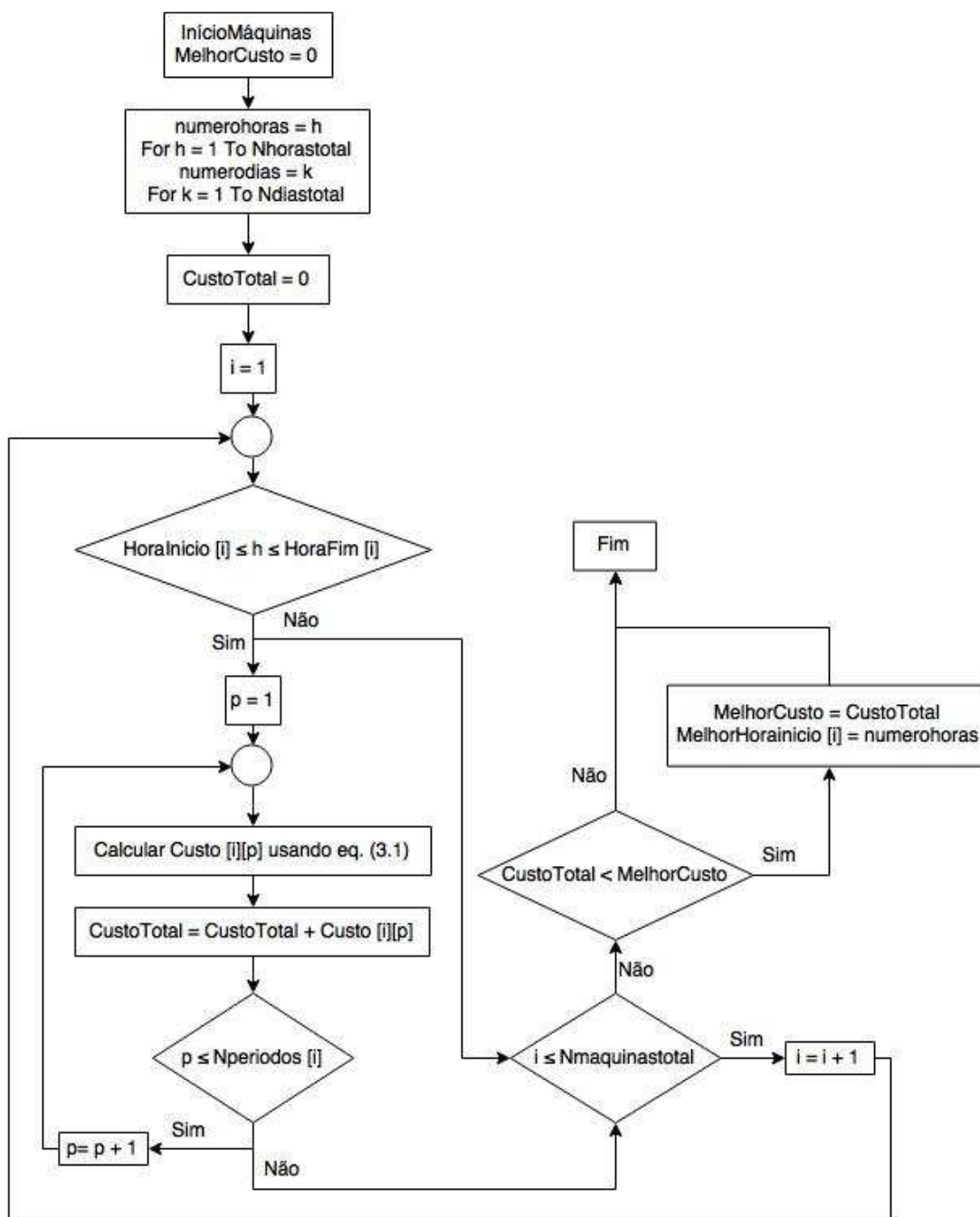


Figura 4.5 - Fluxograma referente à operação de funcionamento das cargas controláveis.

Relativamente à operação de funcionamento do Veículo Elétrico foram também testadas duas abordagens de funcionamento distintas. Numa primeira abordagem foi considerado que aquando das operações de carga e de descarga, a potência utilizada seria sempre a potência máxima permitida pela tecnologia adotada, sendo que o excendente do conjunto das operações seria devolvido à rede e portanto remunerado pela mesma. Contudo esta abordagem mostrou que haveria uma quantidade elevada de energia não utilizada para a satisfação dos consumos referentes às cargas da habitação doméstica, pelo que foi então introduzida uma segunda abordagem, na qual foi admitido que aquando das operações de

carga e de descarga, seria analisada qual a necessidade de consumo referente à hora de descarga, valor que seria adotado como potência de descarga, assim como também para o valor da potência de carga. Esta nova abordagem mostrou benefícios de custo de operação consideráveis e foi então assumida para o nosso sistema de otimização no que concerne a operação de funcionamento do Veículo Elétrico, a qual é representada no fluxograma ilustrado na figura 4.6.

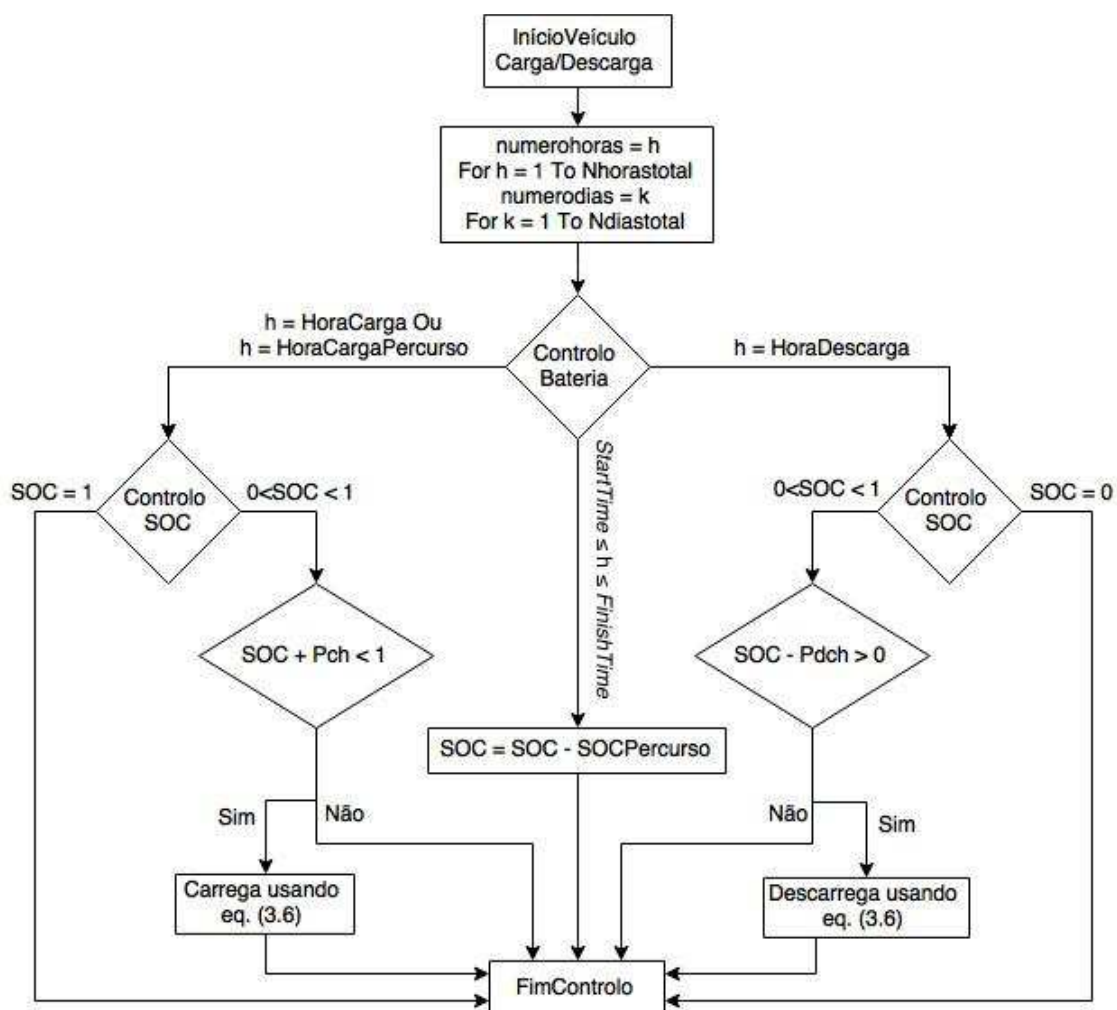


Figura 4.6 - Fluxograma referente à operação de funcionamento do Veículo Elétrico.

Por fim, é efetuada a operação relativa ao funcionamento do sistema de armazenamento por baterias. Também para esta operação foram testadas as duas abordagens implementadas na operação de funcionamento do Veículo Elétrico, tendo o segundo modo também nesta operação se mostrando melhor. A operação de funcionamento do sistema de armazenamento por baterias é ilustrada no fluxograma representado na figura 4.7.

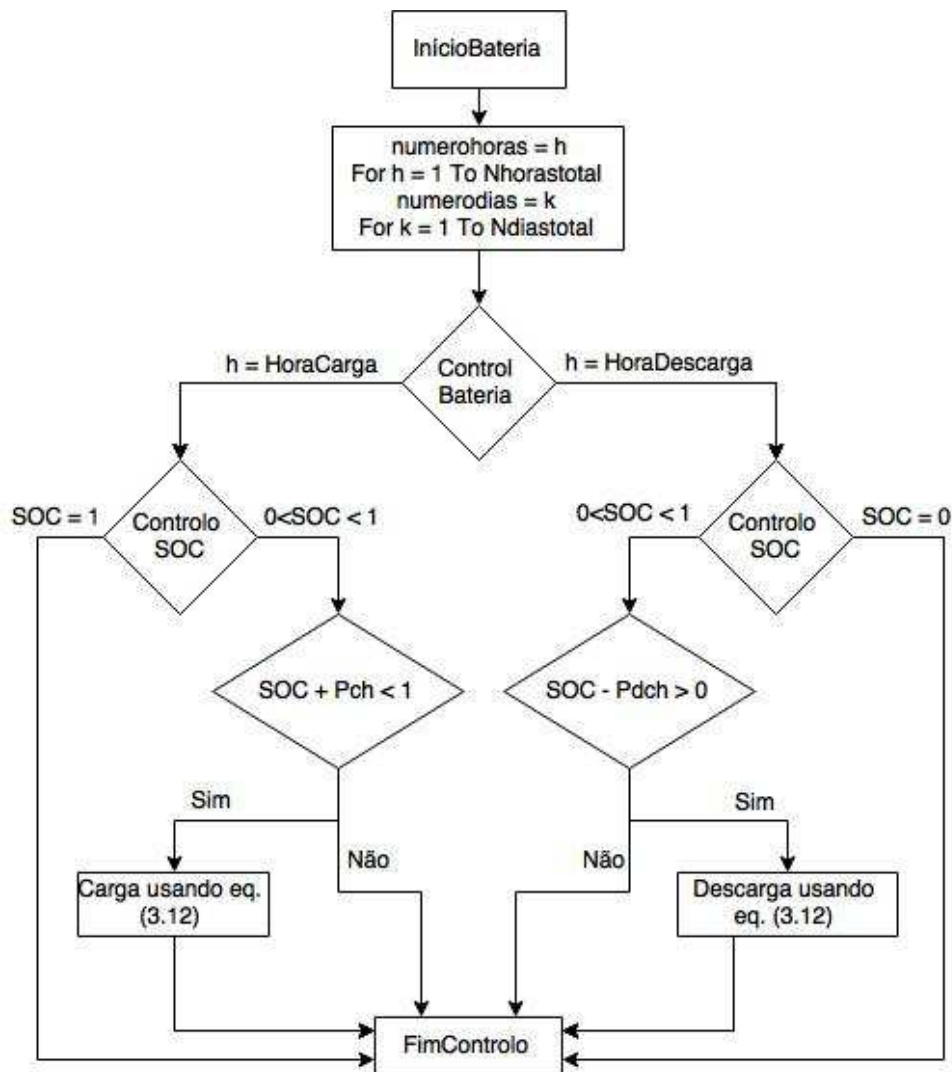


Figura 4.7 - Fluxograma referente à operação de funcionamentos do Sistema de Armazenamento.

Como é possível verificar e como foi já anteriormente referido, os diferentes períodos associados às operações de carga e descarga são posteriormente condicionados pela respetiva capacidade da bateria a qual possui restrições anteriormente já referidas.

De forma a avaliar o impacto do algoritmo de otimização foram criados vários cenários de operação que permitiram assim obter uma comparação dos resultados finais. Os cenários admitidos foram os seguintes:

- Cenário 1 (sigla C1) - “Sistema de otimização usando valores preditivos sem incerteza”:

Corresponde à situação em que é implementado o sistema de otimização desenvolvido, baseado em valores preditivos sem incerteza relativos aos consumos das cargas não controláveis, à produção do sistema fotovoltaico e às temperaturas exteriores, ou seja, não são introduzidos erros de previsão.

- Cenário 2 (sigla C2) - “Sistema de otimização usando valores preditivos com incerteza”:

Corresponde à situação em que é implementado o sistema de otimização desenvolvido, baseado em valores preditivos com incerteza relativos aos consumos das cargas não controláveis, à produção do sistema fotovoltaico e às temperaturas exteriores, ou seja, são introduzidos erros de previsão de forma a avaliar o seu impacto no desempenho do sistema de otimização.

- Cenário 3 (sigla C3) - “Carga com excedente de fotovoltaico à energia máxima”.

Corresponde à situação em que não existe qualquer tipo de otimização introduzida na operação de funcionamento do sistema. Os comportamentos dos diferentes componentes são os seguintes:

- Bomba de Calor: o seu comportamento é controlado pelo termóstato tal como acontece no algoritmo implementado. Contudo, ao contrário do que acontece no sistema de otimização implementado, a bomba de calor não possui a capacidade de satisfazer as preferências de climatização definidas pelo consumidor, sendo que neste cenário o consumidor é responsável pela operação de funcionamento da bomba de calor quando achar conveniente de forma a que a habitação doméstica esteja à temperatura desejada.
 - Cargas controláveis: a sua operação é também sujeita à ação do consumidor o qual é responsável por accionar as máquinas.
 - Veículo Elétrico: funciona sem sistema V2G, não existindo assim a possibilidade de realizar operações de carga e descarga através da RESP de forma a colmatar as necessidades de consumo líquido através de DR. Assim, o veículo elétrico limita-se a efetuar a operação de carregamento na totalidade quando retorna à habitação doméstica, sendo a mesma descarregada de acordo com os trajetos realizados definidos pelas necessidades do consumidor.
 - Sistema de Armazenamento por Baterias: a sua operação de carga é condicionada pela existência de excedente de produção do sistema fotovoltaica, sendo que sempre que tal se verifica, este excedente é carregado para a bateria. A operação de descarga é condicionada pela capacidade da bateria, sendo que neste cenário é admitido que sempre que houver capacidade para tal a bateria descarrega de acordo com a energia máxima de descarga permitida.
- Cenário 4 (sigla C4) - “Carga com excedente de fotovoltaico à energia associada às necessidades de consumo líquido”:

A operação do cenário 4 é em todo semelhante à operação do cenário 3 exceto no funcionamento do sistema de armazenamento de baterias. Neste cenário, o sistema de armazenamento de baterias possui já alguma inteligência que o permite receber dados relativos às necessidades de consumo líquido, sendo que a operação de descarga é realizada a esta energia ao invés de descarregar à sua energia máxima admissível.

- Cenário 5 (sigla C5) - “Cargas e descargas baseadas em sinais de preços”:

A operação do cenário 5 é em todo semelhante às operações do cenário 3 e do cenário 4 exceto no funcionamento do sistema de armazenamento de baterias. Neste cenário, o sistema de armazenamento de baterias recebe informações relativas a preços de energia, e de acordo com estes, estabelece um intervalo de funcionamento para a operação de carga, o qual se verifica em períodos de preços baixos, assim como também um intervalo de funcionamento para a operação de descarga, verificando-se este último em períodos de preços elevados. O sistema de armazenamento por baterias efetua as operações de carga de acordo com as necessidades de energia de consumo líquido verificadas no período mais caro. Assumiu-se como período de carregamento o intervalo [00:00h-04:00h] e como período de descarregamento o intervalo [17:30h-21:30h].

A tabela 4.1. ilustra o resumo das características de cada um dos diferentes cenários implementados.

Tabela 4.1 - Resumo das características dos diferentes cenários implementados.

Resumo das características dos diferentes cenários						
		C1	C2	C3	C4	C5
Dados	Valores preditivos sem incerteza	X				
	Valores preditivos com incerteza		X	X	X	X
Bomba de Calor	Controlo pelo Sistema de Otimização	X	X			
	Controlo pelo Consumidor			X	X	X
Cargas Controláveis	Controlo pelo Sistema de Otimização	X	X			
	Controlo pelo Consumidor			X	X	X
Veículo Elétrico	Com sistema V2G	X	X			
	Sem sistema V2G			X	X	X
Sistema de Armazenamento por Baterias	Controlo pelo Sistema de Otimização	X	X			
	Carrega quando existe excesso de fotovoltaico			X	X	
	Carrega baseado em informação de preços					X

Capítulo 5

Resultados obtidos

Neste capítulo são apresentados e analisados os diferentes resultados obtidos através do sistema de otimização para os dois cenários de operação em que este é implementado sendo de seguida feita uma análise comparativa dos mesmos com os resultados obtidos para a operação dos restantes cenários. É também ilustrado o simulador implementado, através do qual é possível que haja interação do consumidor com o sistema de otimização.

5.1 Simulador implementado.

Com o objetivo de otimizar os custos associados à fatura da eletricidade relativa aos consumos verificados devido à operação do sistema energético de habitação doméstica foi então implementado o algoritmo desenvolvido, o qual foi executado através de um simulador dotado de uma interface que permite que o consumidor interaja com a operação de otimização e manifeste as suas preferências de modo a serem satisfeitas. A figura 5.1. ilustra a interface do simulador desenvolvido através da ferramenta VisualBasic.

Através desta interface é assim possível ao consumidor inserir os diferentes parâmetros relativos às suas preferências nas operações associadas às diferentes tecnologias. Na figura 5.2. é apresentado como exemplo a interface associada à máquina de lavar a roupa na qual o consumidor define qual o intervalo de funcionamento que pretende e á qual pode aceder através do botão Máquina Lavar Roupa implementado na interface central. Através desta interface central é também possível ao consumidor consultar qual a descrição a nível de cargas da sua habitação, através do botão *Home Description*, e, após correr a simulação através do botão Otimização, é possível verificar quais os resultados obtidos acedendo ao botão Resultados.

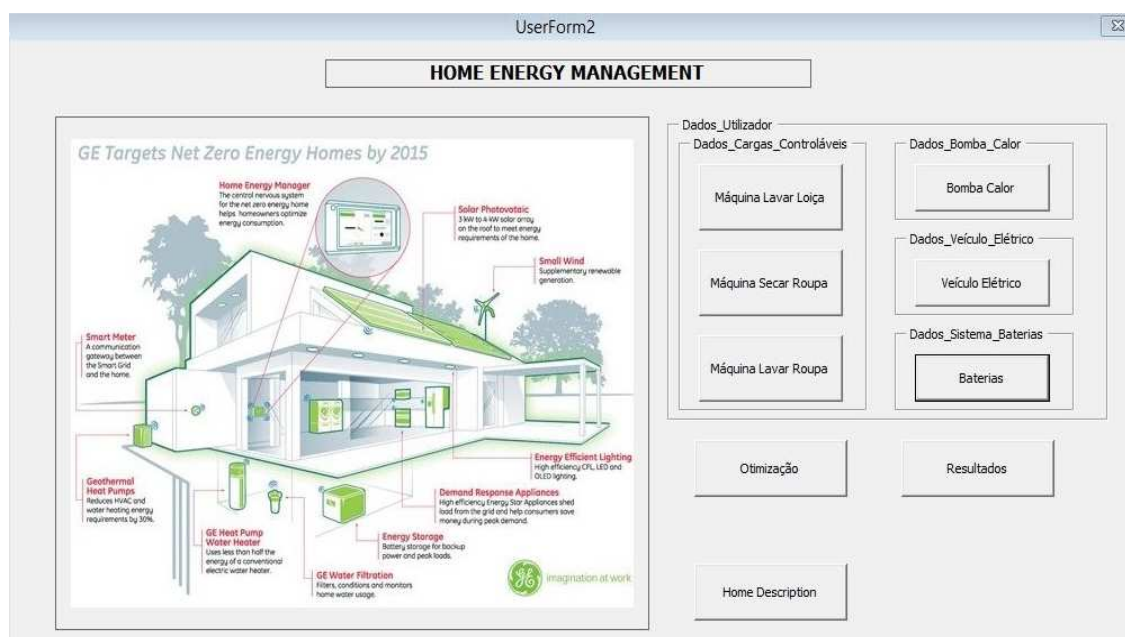


Figura 5.1 - Interface do simulador de otimização desenvolvido através da linguagem de programação VisualBasic.



Figura 5.2 - Interface do simulador de otimização referente à definição dos dados do consumidor para a máquina de lavar roupa.

5.2 Resultados obtidos.

Os valores referentes ao consumo das cargas não controláveis são idênticos para todos os cenários uma vez que correspondem aos valores dos consumos considerados como reais e que se verificam para todos estes. A tabela 5.1. apresenta os diferentes valores associados à operação de consumo por parte das cargas não controláveis.

Tabela 5.1 - Valores referentes à operação de consumo das cargas não controláveis.

Operação das Cargas Não Controláveis	
Consumo Total (kWh)	64,856
Parcela relativa ao autoconsumo (kWh)	18,115
Parcela relativa ao consumo líquido (kWh)	46,741
Custo da Operação (€)	13,40

Após a operação das cargas não controláveis o custo total da operação do sistema tomou o valor total de 15,99 €, devido a um consumo líquido total de 46,741 kWh, sendo que a energia injetada líquida teve o valor de 81,062 kWh.

Os resultados obtidos para a operação da Bomba de Calor relativos aos cenários 1 e 2 são ilustrados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Resultados obtidos referentes à operação de funcionamento da bomba de calor para os cenários 1 e 2.

Operação da Bomba de Calor	
Consumo Total (kWh)	47,330
Parcela relativa ao autoconsumo (kWh)	7,592
Parcela relativa ao consumo líquido (kWh)	39,738
Custo da Operação (€)	7,66

Verificou-se que aproximadamente 7,65% da energia fotovoltaica total produzida é aproveitada para a operação de funcionamento da bomba de calor nos cenários 1 e 2, através do sistema de otimização implementado.

Os resultados referentes às restantes tecnologias diferem de cenário para cenário pelo que serão de seguida apresentados individualmente de acordo com o cenário em questão. Inicialmente serão feitas as análises relativas aos resultados obtidos nos cenários 1 e 2 nos quais é implementado o sistema de otimização desenvolvido e posteriormente será feita a análise relativa aos resultados obtidos para os restantes cenários.

5.2.1 Resultados obtidos para o cenário 1 - “Sistema de otimização usando valores preditivos sem incerteza”.

Após a operação das cargas não controláveis e da bomba de calor, verificou-se que o custo total da operação do sistema tomou o valor total de 19.86 €, devido a um consumo líquido total de 86,48 kWh, sendo que a energia injetada líquida teve o valor de 73,471 kWh. Os resultados obtidos para a operação das cargas controláveis são apresentados na tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Resultados obtidos referentes à operação de funcionamento das cargas controláveis referentes ao cenário 1.

Operação das Cargas Controláveis	
Consumo Total (kWh)	50,4
Parcela relativa ao autoconsumo (kWh)	34,6
Parcela relativa ao consumo líquido (kWh)	15,8
Custo da Operação (€)	3,23

Após a operação das cargas controláveis o custo total da operação do sistema tem o valor total de 23,09 €, devido a um consumo líquido total de 102,28 kWh, sendo que a energia injetada líquida tem o valor de 38,87 kWh. O conjunto de soluções relativas às horas de funcionamento das diferentes cargas controláveis durante o período de simulação são apresentados na tabela 5.4 . É possível observar que foi conseguido efetuar um enorme aproveitamento relativo à produção fotovoltaica, tendo as cargas controláveis sido responsáveis pelo consumo de cerca de 34,89% de toda a energia fotovoltaica produzida. Este facto é visualizado na tabela 5.4. onde se verifica que a operação de funcionamento das máquinas foi otimizada para o um horário em que existe elevada produção fotovoltaica.

Tabela 5.4 - Resultados obtidos referentes às horas de funcionamento das diferentes cargas controláveis ao longo do período de simulação referentes ao cenário 1.

	Hora de Funcionamento						
	2ª Feira	3ª Feira	4ª Feira	5ª Feira	6ª Feira	Sábado	Domingo
Máquina Lavar Loiça	12:00h	13:00h	13:00h	13:00h	13:00h	14:00h	13:00h
Máquina Lavar Roupa	08:00h	09:00h	09:00h	09:00h	09:00h	09:00h	09:00h
Máquina Secar Roupa	13:00h	12:00h	12:00h	12:00h	12:00h	13:00h	12:00h

A tabela 5.5. apresenta os resultados obtidos relativos à operação do Veículo Elétrico. O consumo total do Veículo Elétrico é relativo apenas às suas deslocações, uma vez que as suas operações de carga e descarga são equivalentes, ou seja, o número de operações de carga é igual ao número de operações de descarga, sendo que o algoritmo impõe que o Veículo Elétrico carrega a energia relativa às necessidades de consumo líquido nos períodos mais desfavoráveis determinados através do cálculo do Custo Marginal como foi já referido, a qual é posteriormente descarregada para colmatar essas mesmas necessidades de consumo

líquido, sendo este então reduzido. O facto de a parcela relativa ao autoconsumo ser tão pequena é devido à restrição de horário de operação de carga ao qual o veículo está sujeito.

Com o sistema V2G foi então possível realizar operações de carga e descarga de forma a colmatar as necessidades de consumo líquido cujos resultados obtidos são representados nas figuras 5.3 e 5.4.

Tabela 5.5 - Resultados obtidos referentes à operação de funcionamento do Veículo Elétrico referentes ao cenário 1.

Operação do Veículo Elétrico	
Consumo Total (kWh)	82,5
Parcela relativa ao autoconsumo (kWh)	1,926
Parcela relativa ao consumo líquido (kWh)	80,574
Custo da Operação (€)	11,52

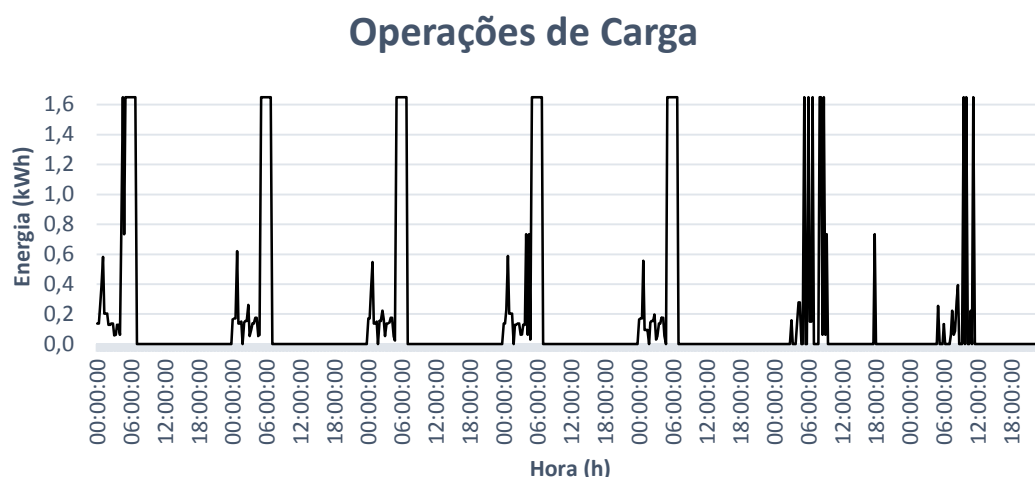


Figura 5.3 - Operações de carga referentes à operação de funcionamento do Veículo Elétrico para o cenário 1.

O custo total associado às operações de carga é de 3,12€ relativo a uma procura de energia através da RESP de 22,351 kWh. É possível verificar que as mesmas acontecem em períodos de preço de energia reduzido (entre as 00:00h e as 06:00h), sendo que excepcionalmente se verifica uma carga fora deste período. Por outro lado, na figura 5.4. é possível verificar que as operações de descarga ocorrem principalmente em períodos de preço de energia elevado (entre as 18:00h e as 24:00h), embora se tenha ainda verificado a existência de operações de descarga fora deste intervalo, se bem que nenhuma delas em períodos de preço de energia reduzido.

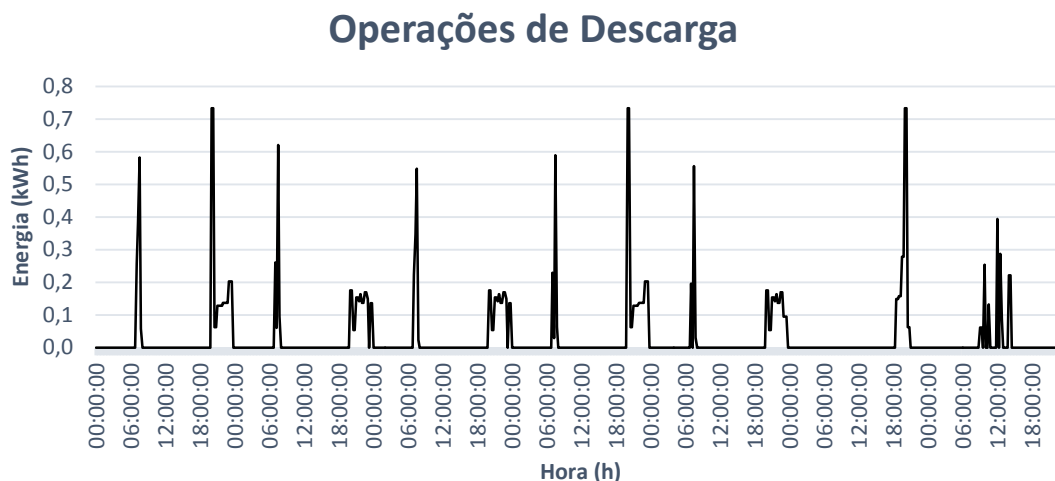


Figura 5.4 - Operações de descarga referentes à operação de funcionamento do Veículo Elétrico para o cenário 1.

O custo total associado às operações de descarga, que corresponde ao valor que a operação tomaria se fosse efetuada a carga correspondente no mesmo período, foi de 4,55 €, e permitiu a uma redução no consumo líquido de 22,351 kWh. Assim, foi permitido poupar com as diferentes operações de carga e de descarga um valor total de 1,43 €.

A figura 5.4. representa a evolução do estado de carga da bateria associada ao Veículo Elétrico. De notar que a bateria mantém o seu estado de carga durante o período de tempo em que o Veículo Elétrico se encontra fora da habitação doméstica, sendo que no instante em que ele retorna à mesma o seu estado de carga é atualizado, sendo-lhe retirada a capacidade utilizada para realizar o trajeto.

Após a operação do Veículo Elétrico o custo total da operação do sistema tomou o valor de 33,23 €, devido a um consumo líquido total de 182,110 kWh, sendo que a energia injetada líquida apresentou o valor de 36,2 kWh, cerca de um terço do seu valor total.

Relativamente ao sistema de armazenamento por baterias este foi responsável pelo aproveitamento de 14,830 kWh da produção do sistema fotovoltaico através das suas operações de carga, as quais no total tiveram um custo de valor 2.45 €, referente a um consumo à RESP de 16,658 kWh. Este comportamento é visível na figura 5.6., onde se pode observar que a maioria das operações de carga do sistema de armazenamento por baterias ocorreu em intervalos de tempo onde existe grande excedente de produção fotovoltaica (entre as 12:00h e as 18:00h) e em intervalos de tempo onde os preços de energia são mais baixos (entre as 00:00h e as 06:00h).

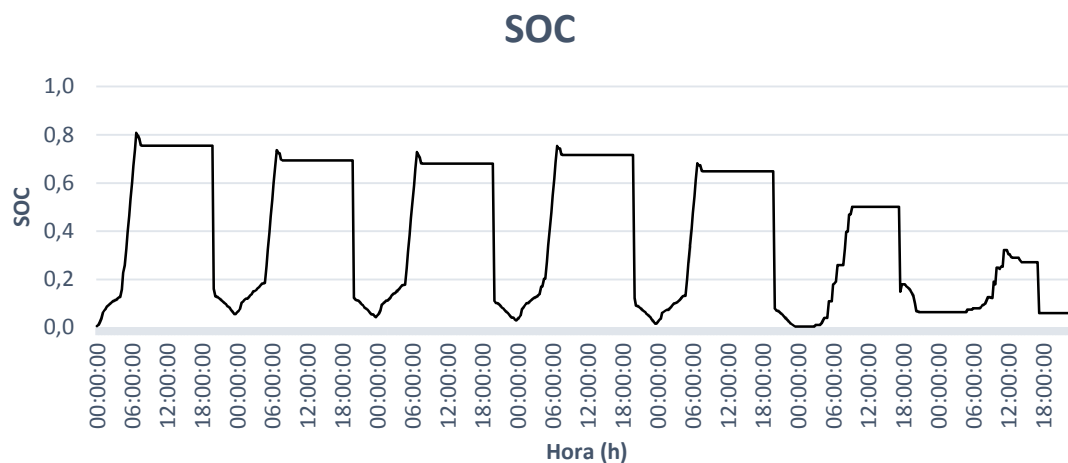


Figura 5.5 - Evolução do estado de carga da bateria associada ao Veículo Elétrico para o cenário 1.

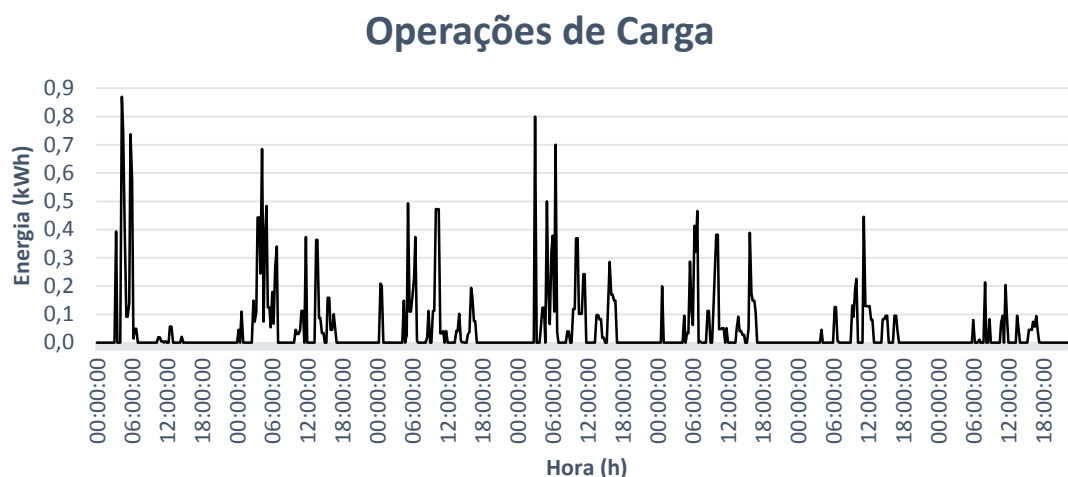


Figura 5.6 - Operações de carga referentes à operação de funcionamento do Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 1.

Por outro lado, através das operações de descarga, o sistema de armazenamento por baterias é responsável pela diminuição do consumo líquido, o qual passou a ser de 166,783 kWh, tendo ao todo descarregado uma energia de valor igual a 31,985 kWh. Assim, as operações de descarga são responsáveis por uma poupança de 8.12 €, sendo que o ganho total da operação de funcionamento da bateria é assim de 5,67 €. É possível verificar na figura 5.7. que a maioria das operações de descarga são verificadas em períodos onde os preços de energia são mais elevados (entre as 18:00h e as 24:00h).

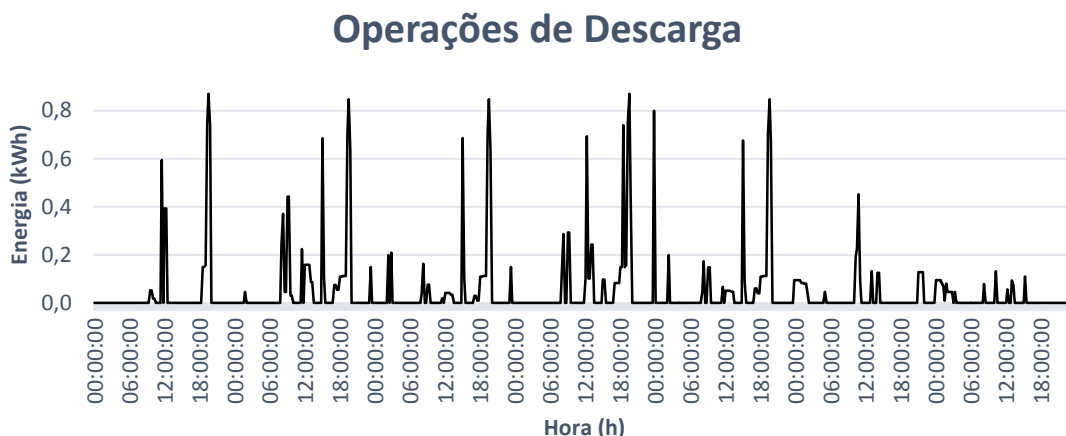


Figura 5.7 - Operações de descarga referentes à operação de funcionamento do Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 1.

Na figura 5.8. é apresentada a curva obtida relativa à evolução do estado de carga do sistema de armazenamento por baterias ao longo do período de simulação.

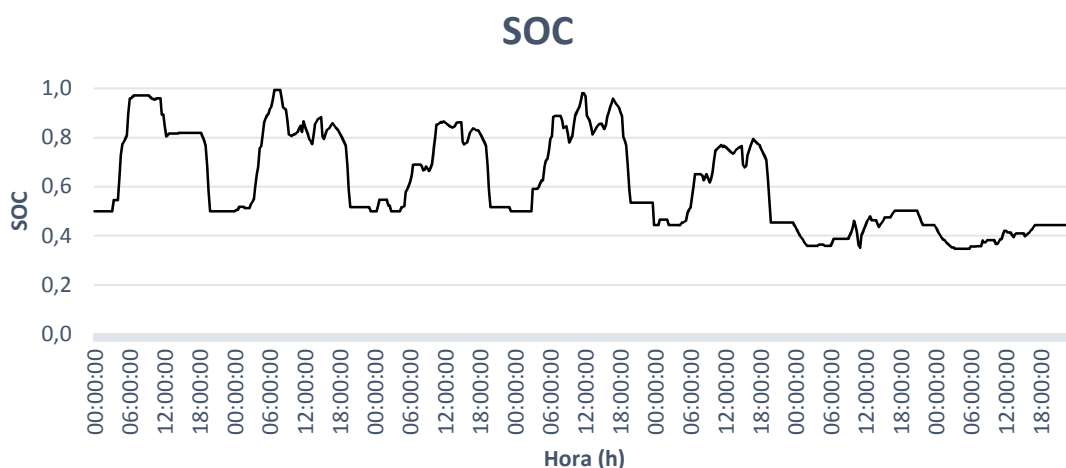


Figura 5.8 -Evolução do estado de carga associada ao Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 1.

Na figura 5.9. é por fim ilustrada a curva relativa à evolução do custo total de operação do sistema ao longo do periodo de simulação. É possível observar que foi conseguido que nas horas de preços de energia mais caro (entre as 18:00h e as 24:00h) não existisse elevado consumo líquido, existindo até períodos em que o mesmo é nulo e que levou a que o valor de custo a pagar nestas fosse somente referente à parcela de uso global do sistema. Os maiores picos de custo ocorrem em periodos onde o preço de energia é mais barato. Esta ação permite assim reduzir o custo total da operação do sistema, sendo este o grande objetivo do trabalho de dissertação.

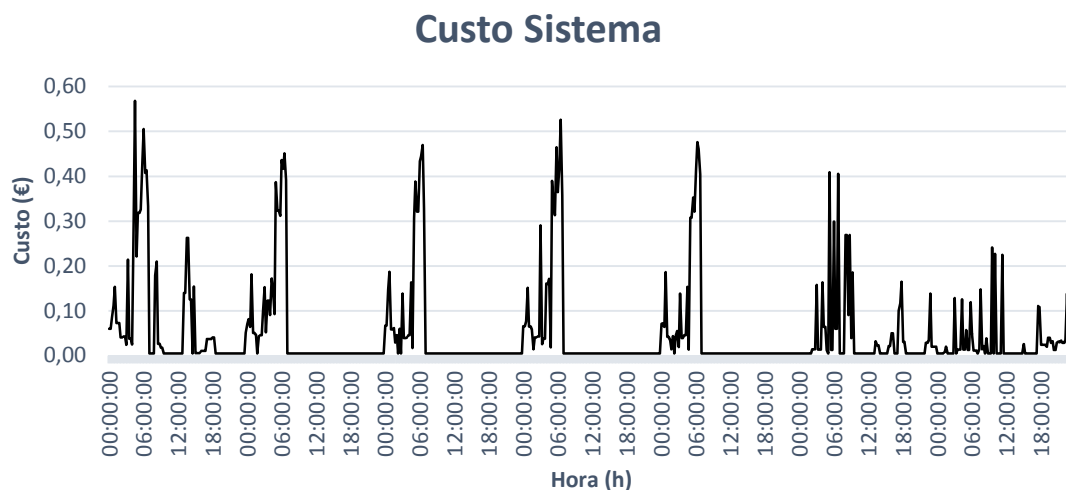


Figura 5.9 - Evolução do custo total de operação do sistema ao longo do periodo de simulação para o cenário 1.

5.2.3 - Resultados obtidos para o cenário 2 - “Sistema de otimização usando valores preditivos com incerteza”.

Após a operação das cargas não controláveis e da Bomba de Calor, verificou-se que, tal como no cenário 1, o custo total da operação do sistema tomou o valor total de 19,86 €, devido a um consumo líquido total de 86,48 kWh, sendo que a energia injetada líquida apresentou o valor total de 73,471 kWh.

Os resultados obtidos para a operação das cargas controláveis no cenário 2 são apresentados na tabela 5.6. Relativamente ao cenário 1 os resultados obtidos foram praticamente semelhantes sendo a diferença entre os dois mínima.

Tabela 5.6 - Resultados obtidos referentes à operação de funcionamento das cargas controláveis referentes ao cenário 2.

Operação das Cargas Controláveis	
Consumo Total (kWh)	50,4
Parcela relativa ao autoconsumo (kWh)	34,5
Parcela relativa ao consumo líquido (kWh)	15,9
Custo da Operação (€)	3,25

Desta forma é possível concluir que os valores preditivos com incerteza utilizados de pouco afetaram a otimização da operação de funcionamento das cargas controláveis, tendo-se conseguido mesmo com a introdução dos erros associados a estes obtidos bons resultados.

Após a operação das cargas controláveis o custo total da operação do sistema tomou o valor de 23,11 €, devido a um consumo líquido total de 102,334 kWh, sendo que a energia injetada líquida tem o valor de 38,925 kWh.

O conjunto de soluções relativas às horas de funcionamento das diferentes cargas controláveis durante o período de simulação são apresentados na tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Resultados obtidos referentes às horas de funcionamento das diferentes cargas controláveis ao longo do período de simulação referentes ao cenário 2.

	Hora de Funcionamento						
	2ª Feira	3ª Feira	4ª Feira	5ª Feira	6ª Feira	Sábado	Domingo
Máquina Lavar							
Loiça	13:00h	13:00h	13:00h	13:00h	13:00h	14:00h	13:00h
Máquina Lavar							
Roupa	09:00h	09:00h	09:00h	09:00h	09:00h	09:00h	09:00h
Máquina Secar							
Roupa	12:00h	12:00h	12:00h	12:00h	12:00h	13:00h	12:00h

A tabela 5.8. apresenta os resultados obtidos relativos à operação do Veículo Elétrico para o cenário 2.

Tabela 5.8 - Resultados obtidos referentes à operação de funcionamento do Veículo Elétrico referentes ao cenário 2.

Operação do Veículo Elétrico	
Consumo Total (kWh)	82,5
Parcela relativa ao autoconsumo (kWh)	1,126
Parcela relativa ao consumo líquido (kWh)	81,374
Custo da Operação (€)	11,61

Neste cenário o consumo total do Veículo Elétrico foi igual ao do obtido no cenário 1 uma vez que a otimização implementada é a mesma. Apesar de também neste caso a diferença ser mínima (0,80 kWh) verificou-se um menor aproveitamento da energia de produção fotovoltaica a qual, tal como foi discutido no cenário 1, nunca poderia ser muito elevada devido às restrições do horário de operação de carga a que o mesmo está sujeito.

Com o sistema V2G também neste cenário possível realizar operações de carga e descarga de forma a colmatar as necessidades de consumo líquido as quais são representadas nas figuras 5.10. e 5.11.

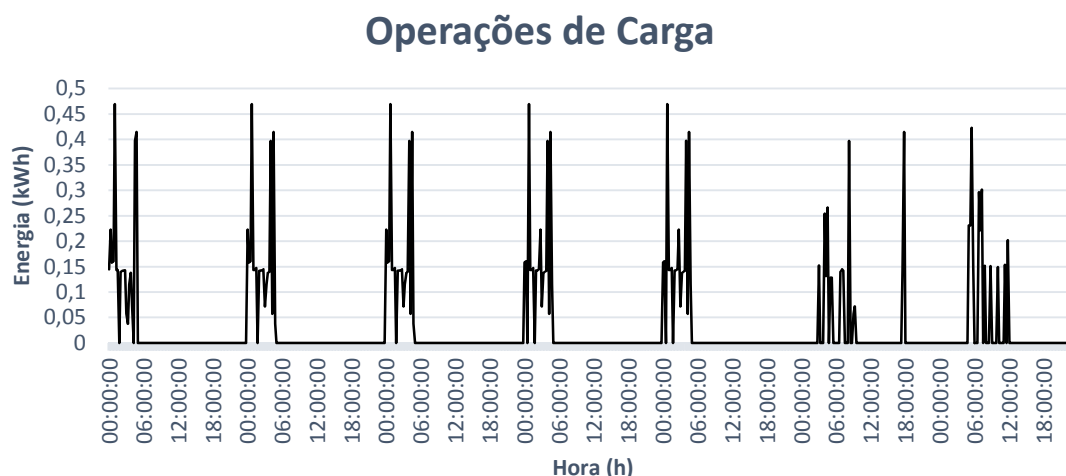


Figura 5.10 - Operações de carga referentes à operação de funcionamento do Veículo Elétrico para o cenário 2.

O custo total associado às operações de carga é de 3,33 € relativo a uma procura de energia através da RESP de 22,616 kWh, sendo que se verificou ainda um consumo de energia relativa à produção fotovoltaica de 1,471 kWh. É possível verificar na figura 5.10. que as operações de carga foram otimizadas de forma a ocorrer em períodos de preço de energia reduzido (entre as 00:00h e as 06:00h), sendo que excecionalmente se verificou uma operação de carga fora deste período. Por outro lado, na figura 5.11. é possível verificar que as operações de descarga ocorrem principalmente em períodos de preço de energia elevado (entre as 18:00h e as 24:00h), embora se tenha verificado a existência de operações de descarga fora deste intervalo como resultado da operação de otimização efetuada.

O custo total associado às operações de descarga foi de 4,16 €, devido a um redução no consumo líquido de 18,29 kWh. Uma vez que a operação do Veículo Elétrico foi simulada de acordo com valores de previsão, a introdução de erros associados aos mesmos fez com que se verificasse um aumento relativo à energia injetada líquida no valor de 3,651 kWh devido ao facto da descarga total de energia ser superior às necessidades do consumo líquido verificadas (valores preditivos com incerteza). Apesar disso, foi permitido poupar com as diferentes operações de carga e de descarga um valor total de 0,83 €, o que comparativamente ao obtido no cenário 1 representa uma diferença de apenas 0,60 €.

A figura 5.12. representa a evolução do estado de carga da bateria associada ao Veículo Elétrico.

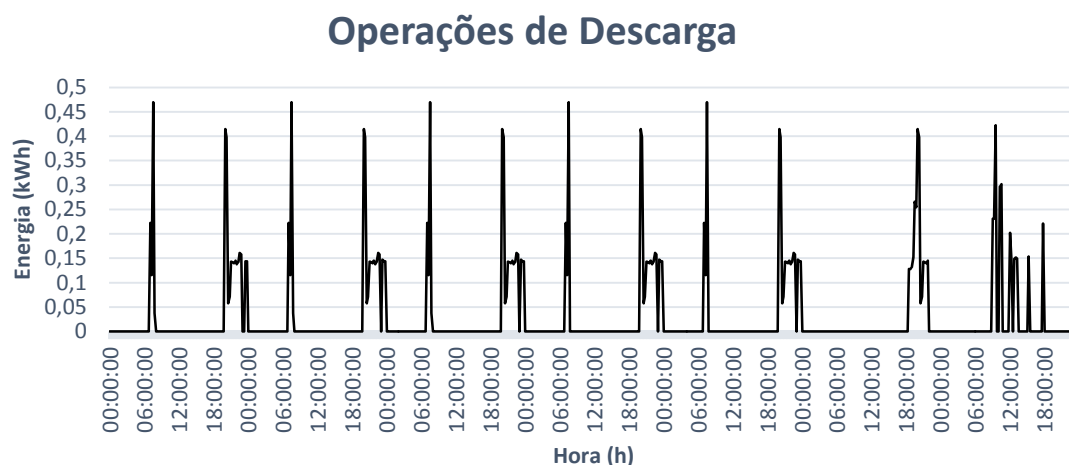


Figura 5.11 - Operações de descarga referentes à operação de funcionamento do Veículo Elétrico para o cenário 2.

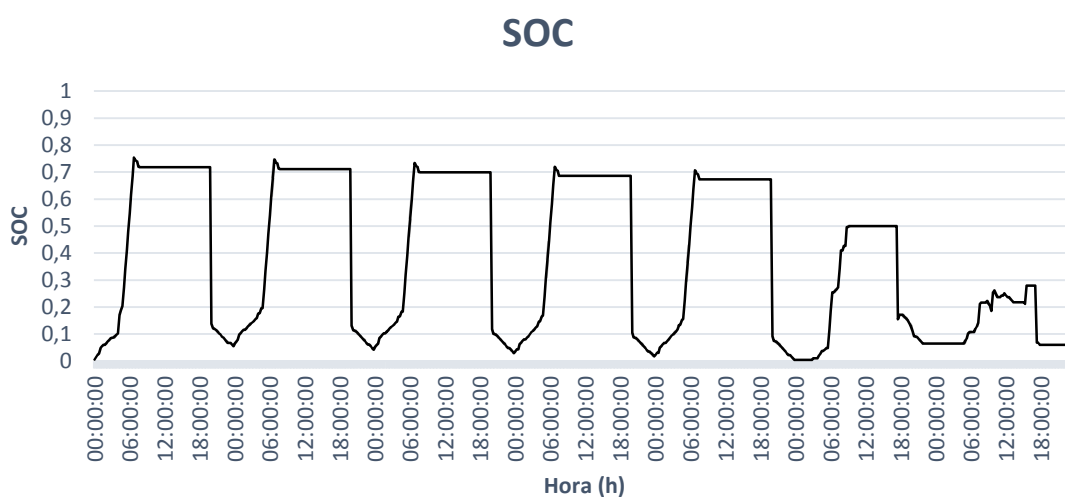


Figura 5.12 - Evolução do estado de carga da bateria associada ao Veículo Elétrico para o cenário 2.

Após a operação do Veículo Elétrico o custo total referente à operação do sistema apresentou o valor de 34,22 €, devido a um consumo líquido total de 186,943 kWh, sendo que a energia injetada líquida tomou o valor de 41,034 kWh.

Relativamente ao sistema de armazenamento por baterias este foi responsável pelo aproveitamento de 12,701 kWh da produção do sistema fotovoltaico através das suas operações de carga, as quais têm no total um custo de valor 2,15 €, referente a um consumo à RESP de 24,942 kWh. Este comportamento é visível na figura 5.13., onde se pode observar que, mais uma vez, foi conseguido com a implementação do sistema de otimização que a maioria das operações de carga do sistema de armazenamento por baterias ocorressem em

intervalos de tempo onde existe um grande excedente de produção fotovoltaica (entre as 12:00h e as 18:00h) e em intervalos de tempo onde os preços de energia são mais baixos (entre as 00:00h e as 06:00h).

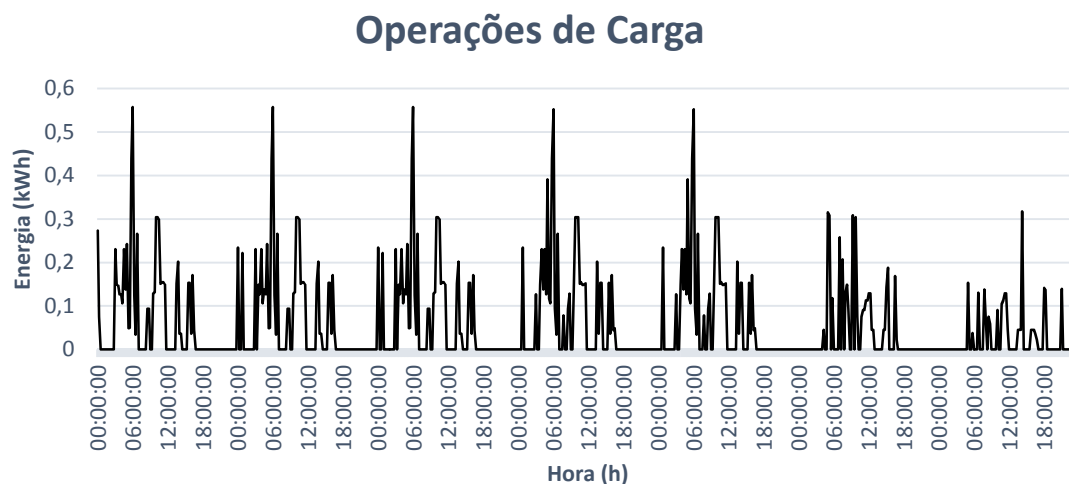


Figura 5.13 - Operações de carga referentes à operação de funcionamento do Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 2.

Contudo, devido aos erros de previsão introduzidos, através das operações de descarga, o sistema de armazenamento por baterias é também responsável pelo aumento da energia injetada líquida de 9,314 kWh, o que faz com que o aproveitamento no fim seja apenas de 3,386 kWh. Por outro lado, a diminuição da energia relativa ao consumo líquido através das operações de descarga foi somente de 3,386 kWh, apesar de ter descarregado uma energia de valor igual a 28,328 kWh. Assim, no final, a energia associada ao consumo líquido passou a ser de 183,677 kWh. Desta forma, as operações de descarga são responsáveis por uma poupança de 4,51 €, sendo que o ganho total da operação de funcionamento da bateria foi assim de 2,36 €. Na figura 5.14. é possível observar que a maioria das operações de descarga são verificadas em períodos onde os preços de energia são mais elevados (entre as 18:00h e as 24:00h).

A figura 5.15. representa a evolução do estado de carga do sistema de armazenamento por baterias.

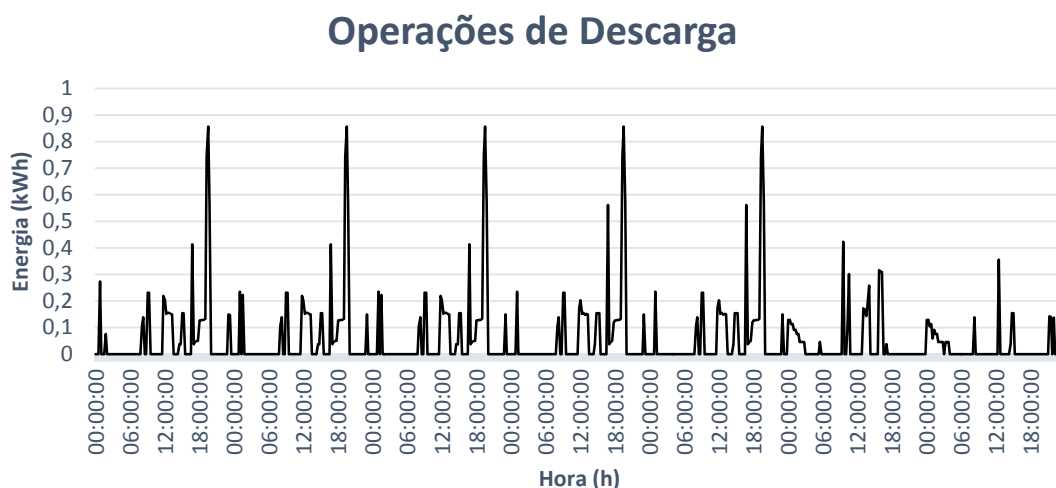


Figura 5.14 - Operações de descarga referentes à operação de funcionamento do Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 2.

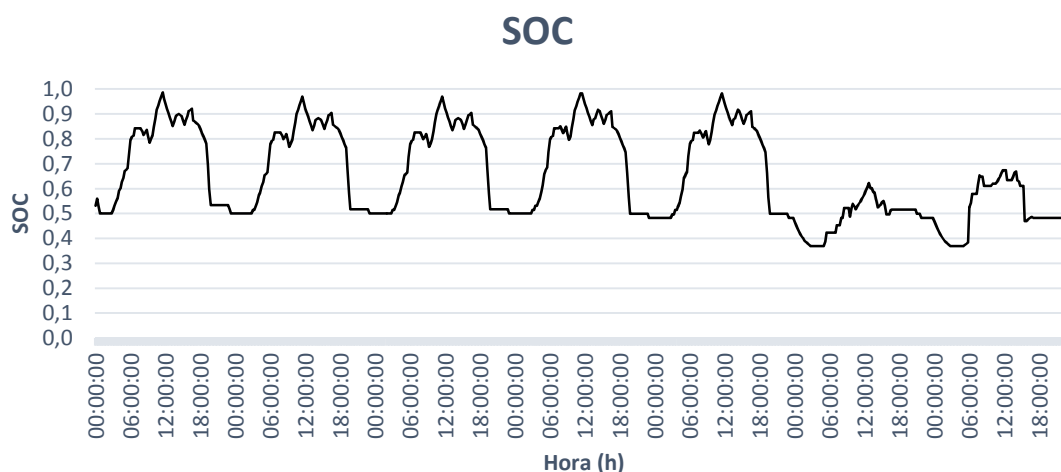


Figura 5.15 - Evolução do estado de carga associada ao Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 2.

A figura 5.16. ilustra a evolução do custo total de operação do sistema ao longo do período de simulação. É possível observar que, tal como no cenário 1, foi conseguido que nas horas de preços de energia mais caro (entre as 18:00h e as 24:00h) o consumo líquido fosse mais reduzido, embora não se verifique como no cenário anterior tantas situações em que este é referente apenas à parcela do uso global do sistema. Este facto vem da otimização ser efetuada segundo valores preditivos grosseiros e que, tal como já foi ilustrado anteriormente, foram considerados iguais para todos os dias. Na realidade, os valores preditivos permitiriam obter um valor intermédio entre os valores obtidos para os cenários 1 e 2, o qual seria bastante satisfatório. Tal como no cenário 1, é possível também observar que a maioria dos picos de custo ocorreram em períodos onde o preço de energia é mais barato, o que permitiu também reduzir o custo total de operação do sistema como pretendido.

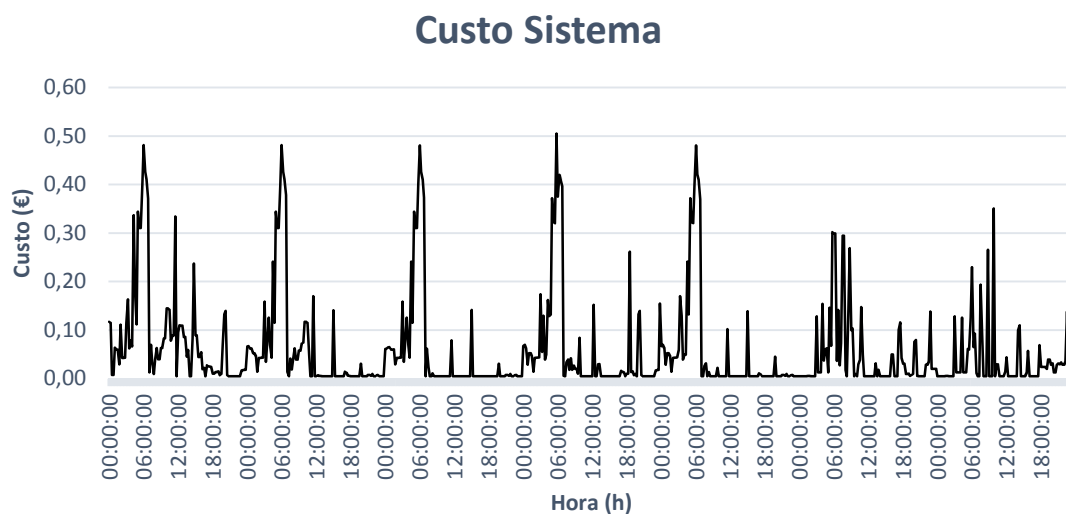


Figura 5.16 - Evolução do custo total de operação do sistema ao longo do período de simulação para o cenário 2.

Relativamente aos cenários 3, 4 e 5, os resultados referentes à operação da Bomba de Calor foram semelhantes, uma vez que a operação da mesma é idêntica nos três, e são apresentados na tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Resultados obtidos referentes à operação de funcionamento da bomba de calor para os cenários 3, 4 e 5.

Operação da Bomba de Calor	
Consumo Total (kWh)	55,257
Parcela relativa ao autoconsumo (kWh)	12,863
Parcela relativa ao consumo líquido (kWh)	42,393
Custo da Operação (€)	8,64

Verificou-se que com a operação de funcionamento aplicada nestes cenários a qual não possui a otimização implementada no sistema desenvolvido o custo de operação foi superior no valor de 1,02€.

Após a operação das cargas não controláveis e da Bomba de Calor, o custo total da operação do sistema nestes três cenários apresentou um valor total de 21,80 €, devido a um consumo líquido total de 95,644kWh, sendo que a energia injetada líquida tomou o valor total de 74,708 kWh.

Para estes três cenários, e uma vez que a operação de funcionamento das cargas controláveis é também idêntica, foram admitidas as seguintes horas de funcionamento para as diferentes cargas controláveis, as quais são representadas na tabela 5.10. Estas foram

admitidas consoante um cenário típico de uma família que não possui qualquer sistema de otimização e em que o próprio consumidor é responsável pela ligação das diferentes cargas controláveis.

Tabela 5.10 - Horários admitidos para as horas de funcionamento das diferentes cargas controláveis ao longo do período de simulação referentes aos cenários 3, 4 e 5.

	Hora de Funcionamento						
	2ª Feira	3ª Feira	4ª Feira	5ª Feira	6ª Feira	Sábado	Domingo
Máquina Lavar							
Loiça	08:00h	08:15h	08:00h	08:30h	08:15h	12:30h	15:00h
Máquina Lavar							
Roupa	22:00h	22:30h	22:00h	23:00h	22:30h	23:30h	21:30h
Máquina Secar							
Roupa	08:00h	08:15h	08:00h	08:30h	08:15h	11:30h	11:00h

Segundo estas horas de funcionamento, foram obtidos os seguintes resultados referentes à operação das cargas controláveis nos cenários 3, 4 e 5 os quais são apresentados na tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Resultados obtidos referentes à operação de funcionamento das cargas controláveis referentes aos cenários 3, 4 e 5.

Operação das Cargas Controláveis	
Consumo Total (kWh)	50,4
Parcela relativa ao autoconsumo (kWh)	15,718
Parcela relativa ao consumo líquido (kWh)	34,682
Custo da Operação (€)	7,58

É possível observar um considerável aumento no custo de operação relativamente aos cenários 1 e 2 no valor de 4,35 €, assim como um menor aproveitamento da produção fotovoltaica, sendo que nestes cenários foram aproveitados menos 18,882kWh. Estes resultados permitem concluir que através do sistema de otimização conseguimos não só reduzir o custo de operação das cargas controláveis ao agendar o seu horário ótimo de funcionamento, como também maximizar o aproveitamento da produção fotovoltaica tal como era pretendido.

Após a operação das cargas controláveis o custo total da operação do sistema tomou o valor de 29,38 €, devido a um consumo líquido total de 130,326 kWh, sendo que a energia

injetada líquida apresentou um valor ainda considerável de 58,99 kWh ao contrário do que se verificou nos cenários em que foi implementado o sistema de otimização.

De seguida são apresentados na tabela 5.12. os resultados referentes à operação de funcionamento do Veículo Elétrico, a qual é também igual para os cenários 3, 4 e 5. A figura 5.17. representa a evolução do estado de carga associado à bateria do Veículo Elétrico.

Tabela 5.12 - Resultados obtidos referentes à operação de funcionamento do Veículo Elétrico referentes aos cenários 3, 4 e 5.

Operação do Veículo Elétrico	
Consumo Total (kWh)	105,067
Parcela relativa ao autoconsumo (kWh)	0
Parcela relativa ao consumo líquido (kWh)	105,067
Custo da Operação (€)	22,62

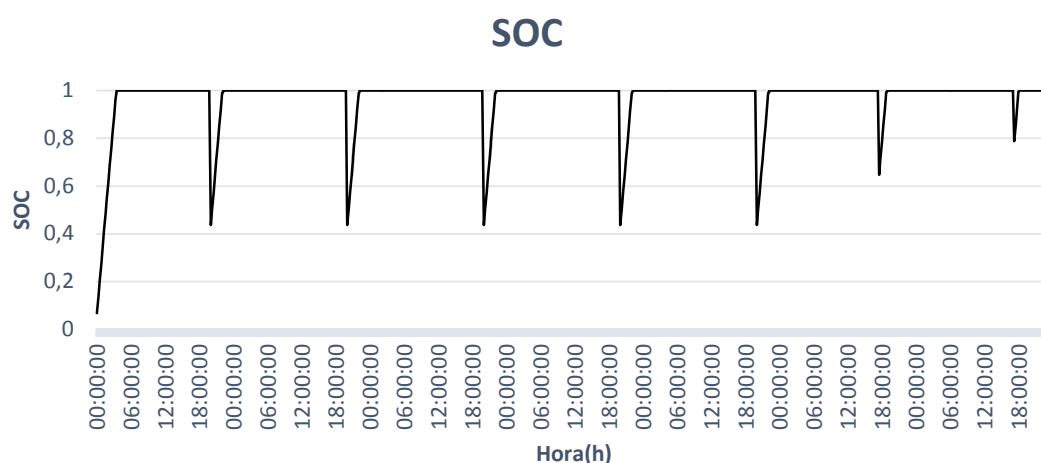


Figura 5.17 - Evolução do estado de carga da bateria associada ao Veículo Elétrico para os cenários 3, 4 e 5.

O custo total de operação do sistema após a operação do Veículo foi de 52 €, sendo que o valor da energia líquida injetada foi de 58,99 kWh e o valor da parcela do consumo referente à RESP de 235,392 kWh, o que levou a um valor de consumo total do sistema igual a 275,58 kWh. De notar que nestes cenários o sistema energética de habitação doméstica não possui o sistema V2G pelo que o Veículo Elétrico funciona somente como uma carga.

Relativamente à operação de funcionamento do sistema de armazenamento por baterias este difere nos três cenários em análise pelo que são de seguida analisados os resultados obtidos para as operações dos mesmos individualmente.

5.2.3 -Resultados obtidos para o cenário 3 - “Carga com excedente de fotovoltaico à energia máxima”.

O sistema de armazenamento por baterias foi neste cenário responsável por uma operação de cargas com um valor total de 58,202 kWh, dos quais 45,016 kWh foram referentes ao aproveitamento realizado pelo sistema de armazenamento por baterias da energia relativa à produção fotovoltaico, e os restantes 13,185 kWh consumidos através da RESP. Desta forma, foi obtido um valor de custo associado à operação de cargas de 3,12€. Apesar de ser esperado que o sistema de armazenamento por baterias efetuasse apenas carregamento através do excedente fotovoltaico, o mesmo não se verifica devido aos erros de previsão introduzidos pelos valores preditivos pelo qual é modelizado o comportamento do sistema neste cenário. O comportamento referente às operações de carga é visível na figura 5.18., onde se pode observar que as operações de carga do sistema de armazenamento por baterias ocorrem praticamente todas nos intervalos de tempo onde existe grande excedente de produção fotovoltaica (entre as 12:00h e as 18:00h).

Por outro lado, através das operações de descarga, o sistema de armazenamento por baterias foi também responsável pelo descarregamento de uma energia total de valor 58,202 kWh. Uma vez que a operação de funcionamento do sistema de armazenamento por baterias foi otimizado através de valores previstos, a energia de descarga não foi igual às necessidades de consumo líquido verificadas pelo que as operações de descarga levaram ao aumento da produção líquida relativamente a uma energia total de 50,76 kWh e, uma vez que este valor é superior ao valor total da energia de carga associada à produção fotovoltaica, obtivemos no final um valor de energia líquida superior ao obtido após a operação do Veículo Elétrico igual a 64,733 kWh. Por outro lado, as operações de descarga foram responsáveis por um descarregamento de apenas 7,442 kWh referente ao consumo líquido, ao qual é associado uma poupança de 1,58€. Estes resultados obtidos são também devidos à implementação adotada em que as operações de descarga são sempre realizadas à potência máxima permitida, sendo este factor o principal responsável pelo aumento da energia injetada líquida uma vez que o valor descarregado é de longe superior às necessidades de consumo líquido, o qual foi reduzido numa parcela muito pouco significativa. Desta forma, as operações de carga e descarga foram neste cenário responsáveis não por um ganho como aconteceu nos cenários 1 e 2, mas por um custo total de operação de funcionamento da bateria de 1,54 €. Apesar disso, é possível observar na figura 5.19. que a maioria das operações de descarga são verificadas em períodos onde os preços de energia são mais elevados (entre as 18:00h e as 24:00h).

Operações de Carga

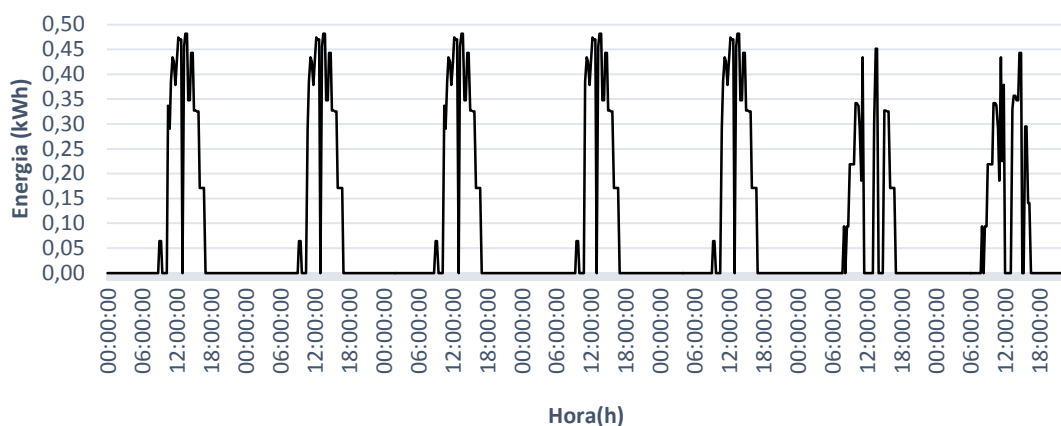


Figura 5.18 - Operações de carga referentes à operação de funcionamento do Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 3.

Operações de Descarga

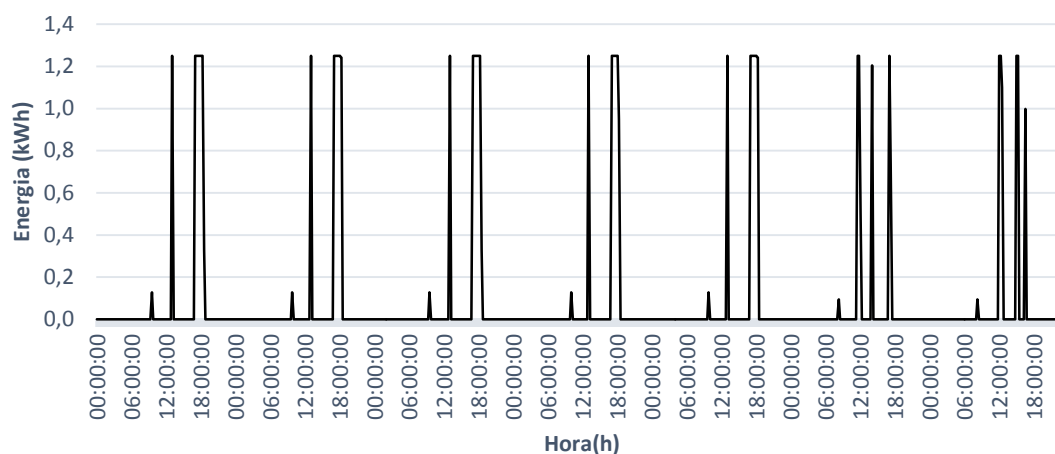


Figura 5.19 - Operações de descarga referentes à operação de funcionamento do Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 3.

Na figura 5.20 é ilustrada a curva obtida referente à evolução do estado de carga do sistema de armazenamento por baterias para o cenário 3.

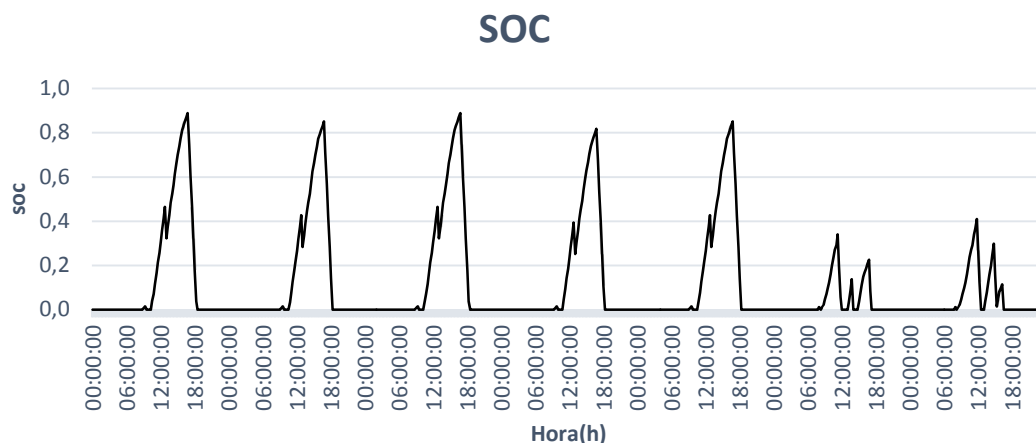


Figura 5.20 - Evolução do estado de carga associada ao Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 3.

Assim, após atuação do sistema de armazenamento por baterias o custo total de operação do sistema foi de 50,78€, sendo que a parcela correspondente à energia injetada líquida foi de 64,733 kWh e a parcela correspondente ao consumo proveniente da RESP de 241,136 kWh. A curva relativa à evolução do custo total de operação do sistema neste cenário é ilustrada na figura 5.21.

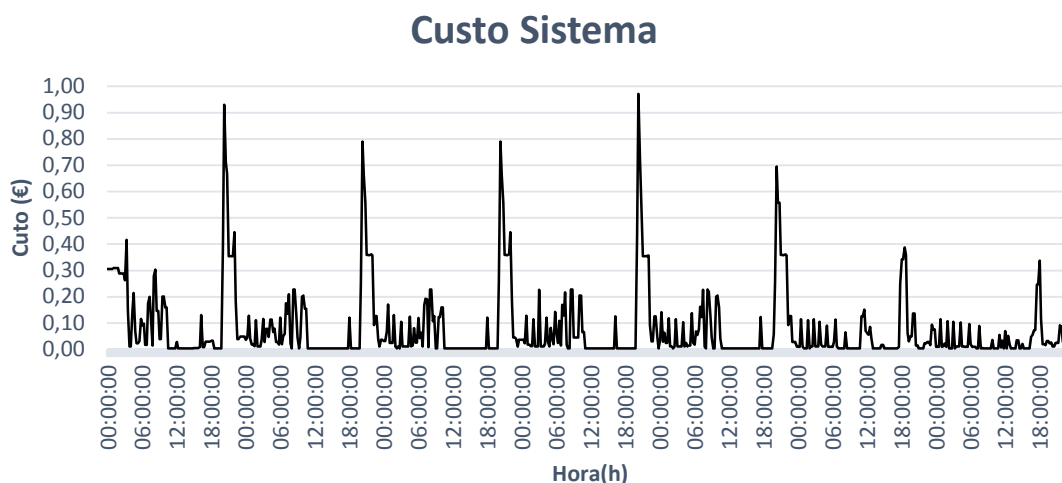


Figura 5.21 - Evolução do custo total de operação do sistema ao longo do período de simulação para o cenário 3.

5.2.4 - Resultados obtidos para o cenário 4 - “Carga com excedente de fotovoltaico à energia associada às necessidades de consumo líquido” .

O sistema de armazenamento por baterias foi neste cenário responsável por uma operação de cargas com o valor total de 57,922 kWh, dos quais 44,876 kWh são referentes ao aproveitamento realizado pelo sistema de armazenamento por baterias da energia relativo à

produção fotovoltaico, sendo os restantes 13,046 kWh consumidos através da RESP. Desta forma, foi obtido um valor de custo associado à operação de cargas de 3,09€. Tal como no cenário 3 verifica-se que as operações de carga não se restringem ao excesso fotovoltaico tal como seria esperado devido aos erros de previsão introduzidos pelos valores preditivos. O comportamento referente às operações de carga é ilustrado na figura 5.22. , onde se pode observar que as operações de carga do sistema de armazenamento por baterias ocorrem praticamente todas nos intervalos de tempo onde existe grande excedente de produção fotovoltaica (entre as 12:00h e as 18:00h).

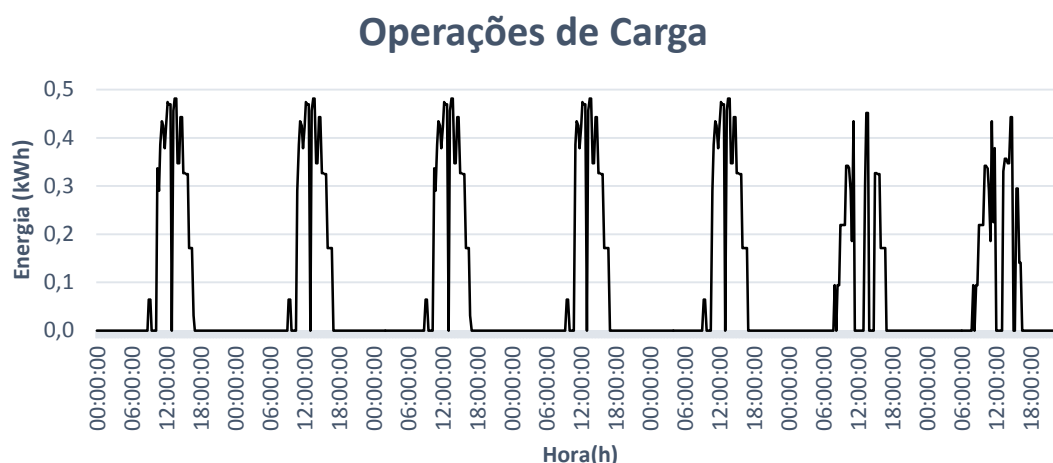


Figura 5.22 - Operações de carga referentes à operação de funcionamento do Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 4.

Por outro lado, através das operações de descarga, o sistema de armazenamento por baterias foi também responsável pelo descarregamento de uma energia total de valor 57,922 kWh. Contudo, apesar de também neste cenário a operação de funcionamento do sistema de armazenamento por baterias ter sido otimizado através de valores preditivos, o aumento da produção líquida foi apenas relativo a uma energia total de 6,781 kWh, menos 43,978kWh do que o obtido no cenário 3, obtendo-se no final um valor de energia líquida inferior ao obtido após a operação do Veículo Elétrico igual a 38,095 kWh, ao contrário do que se verificou no cenário 3. As operações de descarga foram responsáveis por um descarregamento de 51,140 kWh referente ao consumo líquido, ao qual é associado uma poupança de 13,28 €. Desta forma, as operações de carga e descarga foram neste cenário responsáveis por uma poupança total da operação de funcionamento da bateria de 10,19 €. Esta grande diferença de resultados obtidos entre o cenário 3 e 4 é devido ao diferente modo em que a operação de descarga é implementada. No cenário 4, à semelhança do que é implementado no sistema de otimização desenvolvido, o sistema de armazenamento descarrega uma energia associada às necessidades de consumo líquido verificadas nos períodos mais caros. É assim possível concluir os benefícios relativamente ao custo de operação que advém desta implementação.

Na figura 5.23. mais uma vez é visível que a maioria das operações de descarga são verificadas em períodos onde os preços de energia são mais elevados (entre as 18:00h e as 24:00h).

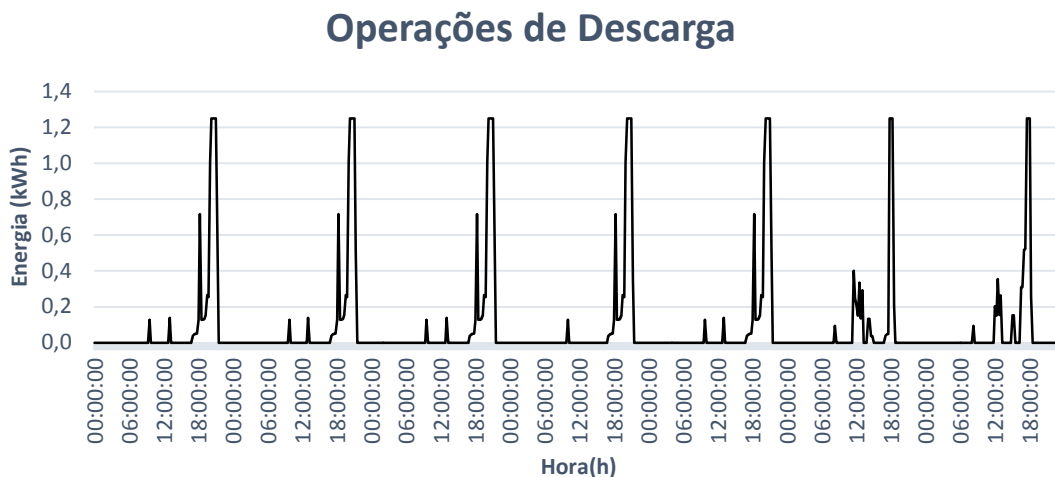


Figura 5.23 - Operações de descarga referentes à operação de funcionamento do Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 4.

A figura 5.24. representa a curva obtida referente à evolução do estado de carga do sistema de armazenamento por baterias para o cenário 4.

Assim, após a atuação do sistema de armazenamento por baterias o custo total de operação do sistema foi de 40,90€, menos 9,88€ do que o valor obtido para o cenário 3, sendo que a parcela correspondente à energia injetada líquida é de 20,895 kWh e a parcela correspondente ao consumo proveniente da RESP é de 197,298 kWh. A figura 5.23. representa a evolução da curva obtida para o custo total associado à operação de funcionamento do sistema no cenário 4.

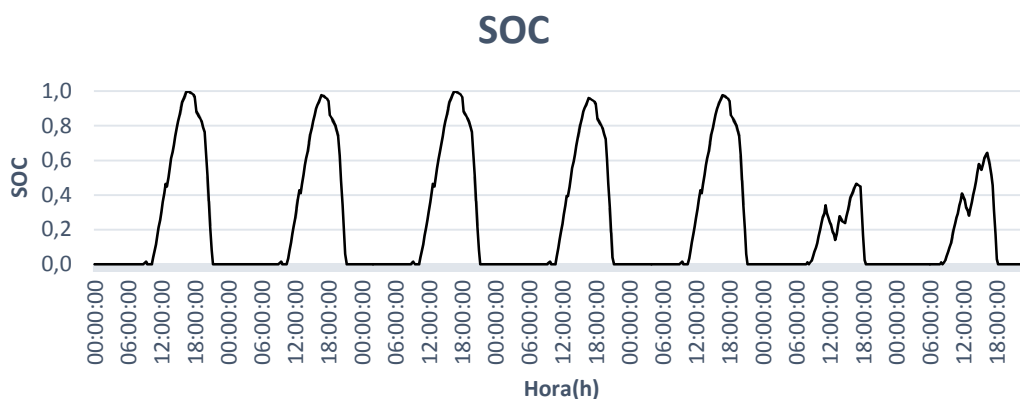


Figura 5.24 - Evolução do estado de carga associada ao Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 4.

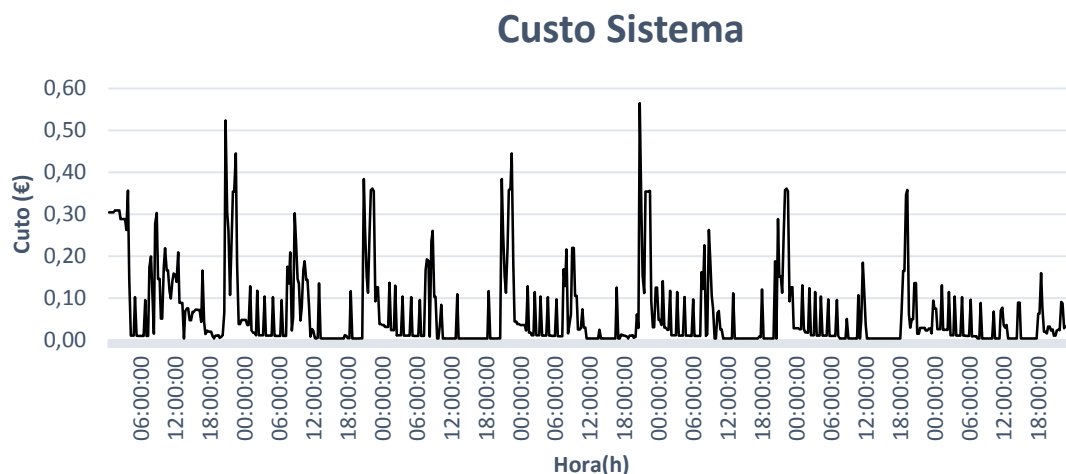


Figura 5.25 - Evolução do custo total de operação do sistema ao longo do período de simulação para o cenário 4.

5.2.5 - Resultados obtidos para o cenário 5 - “Cargas e descargas baseadas em sinais de preços”:

Por fim, no cenário 5, o sistema de armazenamento por baterias foi responsável por uma operação de cargas no valor total de 61,177 kWh, sendo que, uma vez que as operações de carga ocorrem em períodos de preço de energia baixos, e uma vez que para este foi admitido o intervalo de tempo 00:00h e 04:00h que corresponde ao período horário de vazio, não se verificou qualquer aproveitamento referente à energia de produção fotovoltaica uma vez que a mesma neste período é nula. Assim, a energia de 61,177 kWh é consumida através da RESP, tendo sido obtido um valor de custo associado à operação de cargas de 9,98 €. O comportamento referente às operações de carga é ilustrado na figura 5.26., onde se pode observar que as operações de carga do sistema de armazenamento por baterias ocorrem todas no intervalo de tempo definido tal como foi implementado.

Por outro lado, através das operações de descarga, o sistema de armazenamento por baterias foi também responsável pelo descarregamento de uma energia total de valor 61,177 kWh. Mais uma vez, devido à operação de funcionamento do sistema de armazenamento por baterias ter sido otimizada através de valores preditivos, a energia de descarga não se verificou como sendo igual às necessidades de consumo líquido verificadas pelo que as operações de descarga levaram ao aumento da produção líquida de uma energia total de 6,666 kWh e, uma vez que não existe aproveitamento da mesma para as operações de carga, no final verificou-se um aumento do valor total da energia líquida, o qual foi de 65,656 kWh. Por outro lado, as operações de descarga são responsáveis por um descarregamento de 54,51 kWh referente ao consumo líquido, ao qual é associado uma poupança de 13,70 €. Desta forma, as operações de carga e descarga são neste cenário responsáveis por uma poupança total da operação de funcionamento da bateria considerável de 3,72 € tal como era esperado. Apesar de não se ter conseguido maximizar a produção fotovoltaica neste cenário devido à

operação ser efetuado de acordo com intervalos de preços de energia, foi possível reduzir o custo total de operação tal como era pretendido. É possível verificar na figura 5.27. que, tal como dimensionado, as operações de descarga são verificadas no intervalo de tempo 17:30h-21:30h onde os preços de energia são consideravelmente elevados.

A figura 5.27. representa a curva obtida referente à evolução do estado de carga do sistema de armazenamento por baterias para o cenário em questão.

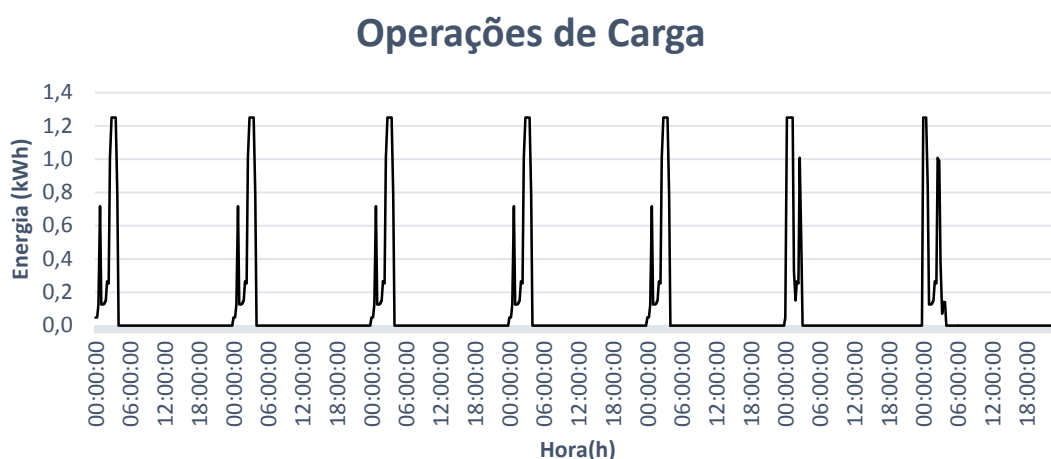


Figura 5.26 - Operações de carga referentes à operação de funcionamento do Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 5.

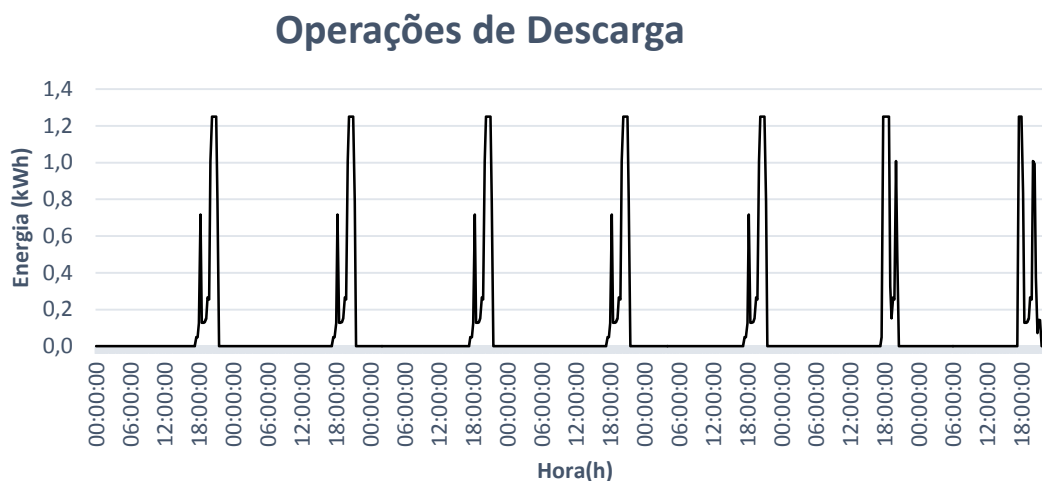


Figura 5.27 - Operações de descarga referentes à operação de funcionamento do Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 5.

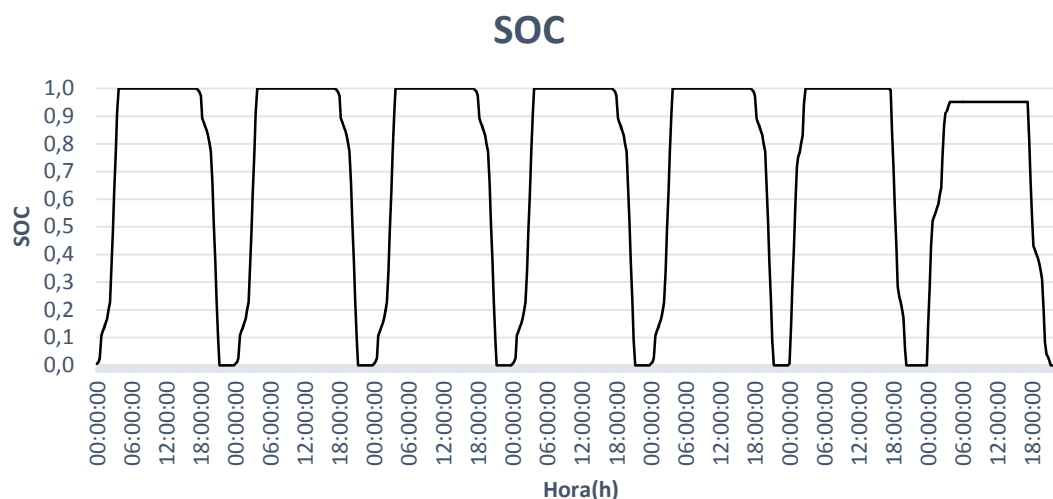


Figura 5.28 - Evolução do estado de carga associada ao Sistema de Armazenamento por Baterias para o cenário 5.

Desta forma, após atuação do sistema de armazenamento por baterias o custo total de operação do sistema obtido para este cenário foi de 45,38€, sendo que a parcela correspondente à energia injetada líquida foi de 65,656 kWh e a parcela correspondente ao consumo proveniente da RESP foi de 242,059 kWh. Na figura 5.28. é ilustrada a curva obtida referente à evolução do custo total associado à operação de funcionamento do sistema no cenário 5.

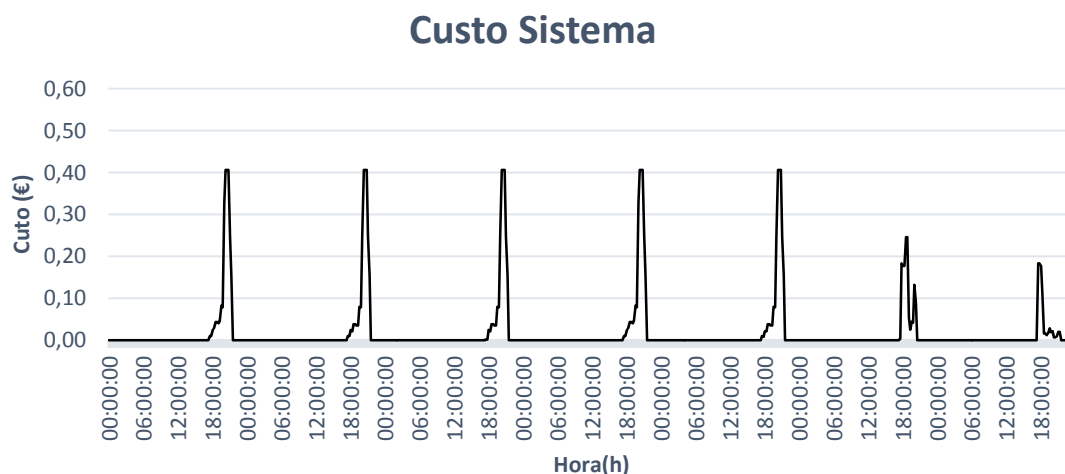


Figura 5.29 - Evolução do custo total de operação do sistema ao longo do período de simulação para o cenário 5.

Na tabela 5.13. é apresentada uma comparação relativa aos resultados finais associados aos diferentes cenários como análise comparativa. Desta é possível verificar que através da implementação do sistema de otimização nos cenários 1 e 2 é possível obter valores de custo

total de operação bastante inferiores relativamente aos obtidos nos restantes cenários sendo que a maior diferença obtida foi de 19,04€ entres os cenário 1 e cenário 3.

Tabela 5.13 - Comparação dos resultados finais obtidos para os diferentes cenários.

Comparação dos resultados finais					
	C1	C2	C3	C4	C5
Consumo Total (kWh)	244,591	244,935	275,580	275,580	275,580
Consumo Líquido Total (kWh)	166,783	183,422	241,136	197,28	242,059
Injetada Líquida Total (kWh)	21,37	37,665	64,733	20,895	65,656
Valor a Pagar à Rede Total (€)	33,9	39,06	53,54	41,81	48,28
Valor Remuneração Total (€)	0,96	1,65	2,76	0,91	2,9
Valor Custo Total (€)	32,94	37,42	50,78	40,90	45,38

Capítulo 6

Conclusão

6.1 Conclusões gerais

O aparecimento de uma infraestrutura de medição avançada tem permitido que seja possível fornecer aos sistemas de otimização informação cada vez mais detalhada relativa a diversos dados do sistema energético de habitação doméstica e que permitem que os mesmos, cuja implementação está a crescer, consigam alcançar resultados cada vez melhores nas suas diversas operações. Por outro lado, há que salientar o impacto que as informações preditivas e consequentemente as técnicas de previsão implementadas têm nos sistemas de otimização. Contudo, o facto de estas terem vindo a ser aperfeiçoadas ao longo dos tempos e permitirem que hoje em dia seja já possível obter valores bastante próximos dos valores reais, é um fator bastante positivo para a implementação destes sistemas de otimização, uma vez que tal como foi possível concluir, estes valores preditivos afetam os resultados associados às operações dos sistemas de otimização. Para este efeito foi interessante terem sido criados dois cenários opostos (um baseado em valores sem qualquer erro de previsão e outro baseado em valores com erros de previsão grosseiros) e que mostraram que, apesar de os resultados serem diferentes, esta diferença não é de todo significativa.

Através da criação de cenários com diferentes níveis de inteligência e posterior análise dos resultados obtidos nos mesmos comparativamente aos resultados obtidos nos cenários em que é implementado o sistema de otimização desenvolvido, foi possível analisar neste trabalho de dissertação, que estes sistemas de otimização por sua vez são responsáveis por permitir não só uma considerável redução do custo associado à fatura energética relativa ao sistema energético de habitação doméstica, o que nos dias que correm é de grande valor para diversas famílias, mas também são responsáveis por permitir que seja possível maximizar o aproveitamento de fontes de energia limpa, e desta forma, ao criar valor para as mesmas,

permitem que a sua penetração continue a crescer, podendo vir a mostrar-se importantes para alcançar as metas 2020.

Por outro lado foi possível analisar o impacto que as diversas tecnologias presentes ao nível do sistema energético de habitação doméstica deste trabalho de dissertação têm no sistema de otimização implementado. Neste ponto foi possível concluir que o modo de operação determinado para as diferentes tecnologias pode influenciar a solução do sistema de otimização, sendo que existem modos de funcionamento que melhoram significativamente os resultados obtidos.

Numa análise individual verificou-se que a bomba de calor é uma tecnologia que, mesmo sem ter sido sujeita a uma vasta otimização, a qual poderia ser melhorada com a introdução de armazenamento térmico, apresenta consumos bastante reduzidos, permitindo através do sistema de otimização implementado satisfazer as necessidades do consumidor a um custo razoavelmente baixo. Relativamente ao Veículo Elétrico, este apesar de representar o meio de transporte do utilizador e, por isso, estar sujeito a necessidades de deslocações do mesmo que condicionam a sua disponibilidade, foi possível observar as poupanças que o seu sistema V2G permite obter ao efetuar cargas e descargas responsáveis pela diminuição do consumo líquido. Já o sistema de armazenamento de baterias mostrou-se essencial no aproveitamento da produção fotovoltaica, tendo permitido alcançar resultados bastante satisfatórios, e sendo um grande responsável pela diminuição do custo total associado à fatura da eletricidade.

No global os resultados obtidos para os cenários em que foi implementado o sistema de otimização foram bastante satisfatórios para todo o período de simulação de uma semana.

6.2 Satisfação de objetivos

No que concerne à satisfação de objetivos pode-se concluir o seguinte relativamente aos objetivos estipulados:

- Ao longo deste trabalho de dissertação foi desenvolvido um sistema de otimização preditiva de operação para uma casa inteligente que permitiu obter resultados bastante satisfatórios relativos às reduções nos custos associados à faturação de um sistema energético de habitação doméstica.
- Foi possível combinar as vertentes de consumo de energia elétrica convencional, com consumo de energia nos transportes, consumo de energia para aquecimento e arrefecimento e armazenamento de energia elétrica, ao desenvolver um sistema de otimização preditiva para um sistema energético de habitação doméstica composto por cargas controláveis e não controláveis, veículo elétrico, bomba de calor e um sistema de armazenamento de energia por baterias.

- Através dos resultados individuais obtidos e analisados relativos às diferentes tecnologias nos diferentes cenários criados foi possível compreender e avaliar o impacto que estas apresentaram para o sistema de otimização desenvolvido.
- Foram obtidos resultados bastante satisfatórios no que respeita ao aproveitamento da produção fotovoltaica como forma de energia limpa presente ao nível do sistema energético da habitação doméstica, uma vez que no melhor cenário foi permitido um aproveitamento de 78.45% da mesma.
- Através da criação de dois cenários opostos (um baseado em valores sem qualquer erro de previsão e outro baseado em valores com erros de previsão grosseiros) foi possível compreender e analisar o impacto de informação preditiva no sistema de otimização preditiva.

Assim, dum modo geral, podemos concluir que os objetivos delineados para este trabalho de dissertação foram alcançados na sua plenitude.

6.3 Trabalhos futuros

A realização deste trabalho de dissertação levantou algumas questões sobre o trabalho que poderá ser feito em continuação do presente. Desta forma são de seguida apresentados alguns dos tópicos a melhorar e/ou desenvolver:

- Analisar o impacto que o armazenamento de energia térmica por parte da bomba de calor poderá ter no sistema de otimização preditiva.
- Analisar o comportamento do sistema de otimização preditivo com valores preditivos reais.

Referências

[1-82]

- [1] J. Wang, Z. Sun, Y. Zhou, and J. Dai, "Optimal dispatching model of smart home energy management system," in *Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), 2012 IEEE*, 2012, pp. 1-5.
- [2] A. Saad al-sumaiti, M. H. Ahmed, and M. M. Salama, "Smart home activities: A literature review," *Electric Power Components and Systems*, vol. 42, pp. 294-305, 2014.
- [3] M. E. El-Hawary, "The Smart Grid—State-of-the-art and Future Trends," *Electric Power Components and Systems*, vol. 42, pp. 239-250, 2014.
- [4] Available: <http://energy-conscious.net/smart-home/>
- [5] *What is Home Automation?* Available: <http://www.smarthome.com/sc-what-is-home-automation>
- [6] A. Rayapura. (2014). *Honda Unveils Net Zero Energy 'Smart Home' on UC Davis Campus*. Available: http://www.sustainablebrands.com/news_and_views/cleantech/aarthi_rayapura/honda_unveils_net_zero_energy_smart_home_uc_davis_campus
- [7] *Autoconsumo: o que é?* Available: <http://sunenergy.pt/particulares/auto-consumo/>
- [8] *Autoconsumo: oportunidades para consumidores domésticos e industriais*. Available: <http://www.voltimum.pt/campanha/autoconsumo-oportunidades-para-consumidores-domesticos-e-industriais>
- [9] *Objectivos da estratégia Europa 2020*. Available: http://ec.europa.eu/europe2020/targets/eu-targets/index_pt.htm
- [10] S. O. Gaëtan Masson (iCARES Consulting), Manoël Rekinger, "Global Market Outlook For Photovoltaics 2014-2018."
- [11] J. Widén and J. Munkhammar, "Evaluating the benefits of a solar home energy management system: impacts on photovoltaic power production value and grid interaction," in *Proceedings of the eceee 2013 Summer Study, Presqu'île de Giens, France, June 3-8, 2013*, 2013.
- [12] R. Luthander, J. Widén, D. Nilsson, and J. Palm, "Photovoltaic self-consumption in buildings: A review," *Applied Energy*, vol. 142, pp. 80-94, 2015.
- [13] K. Solar. *Autoconsumo Fotovoltaico*. Available: <http://pt.krannich-solar.com/pt/autoconsumo.html><http://pt.krannich-solar.com/pt/autoconsumo.html>
- [14] C. M. F. SYSTEC), "Autoconsumo, na perspetiva de consumidores industriais, e não só."
- [15] J. M. R. Balsa, "Avaliação do impacto da introdução de veículos elétricos na procura de combustíveis em Portugal," 2013.
- [16] "Mercado de veículo elétrico evoluiu e pode tornar nossas cidades mais inteligentes," in *Schneider Electric Blog* S. Electric, Ed., ed.
- [17] Gartner, "Hype Cycle for Emerging Energy Technologies, 2013," 19 July 2013.
- [18] "Vehicle-to-Grid (V2G) - Global Market Analysis and Forecasts to 2020," 2010.
- [19] S. Habib, M. Kamran, and U. Rashid, "Impact analysis of vehicle-to-grid technology and charging strategies of electric vehicles on distribution networks-A review," *Journal of Power Sources*, vol. 277, pp. 205-214, 2015.

- [20] S. Misra, S. Bera, and T. Ojha, "D2P: Distributed Dynamic Pricing Policy in smart grid for PHEVs management," 2014.
- [21] F. Fattori, N. Anglani, and G. Muliere, "Combining photovoltaic energy with electric vehicles, smart charging and vehicle-to-grid," *Solar Energy*, vol. 110, pp. 438-451, 2014.
- [22] M. Silveiras. (2015). *Empresas vão ter fundos europeus para comprar carros eléctricos*. Available: http://economico.sapo.pt/noticias/empresas-vaio-ter-fundos-europeus-para-comprar-carros-electricos_212971.html
- [23] *Bombas de Calor permitem reduzir até 70% na fatura energética*. Available: <http://www.homie.com.pt/novidades/index/42>
- [24] *Bombas de Calor*. Available: http://www.paulogomeslda.com/?p=p_3&sName=bombas-de-calor
- [25] Q. E. Building. Available: <http://www.qzero.pt/bc.html>
- [26] C. L. E. A. R. E. Technologies, "Bombas de Calor," in *Energias Renováveis em Casa*, ed.
- [27] I. E. Commission, "Electric Energy Storage."
- [28] K. Divya and J. Østergaard, "Battery energy storage technology for power systems—An overview," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, pp. 511-520, 2009.
- [29] D. Vanhoudt, D. Geysen, B. Claessens, F. Leemans, L. Jespers, and J. Van Bael, "An actively controlled residential heat pump: Potential on peak shaving and maximization of self-consumption of renewable energy," *Renewable Energy*, vol. 63, pp. 531-543, 2014.
- [30] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, and Y. Ding, "Progress in electrical energy storage system: A critical review," *Progress in Natural Science*, vol. 19, pp. 291-312, 2009.
- [31] N. L. P. Martins, "Sistema Integrado de Produção e Armazenamento de Energia a partir de Fontes Renováveis," ed, 2007.
- [32] L. FF Solar Energias Renováveis. *Sistemas autónomos*. Available: <http://www.ffiolar.com/index.php?lang=PT&page=sistemas-autonomos>
- [33] B. Roberts, "Capturing grid power," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 7, pp. 32-41, 2009.
- [34] E. S. Association. *Nickel-Cadmium (NI-CD) Batteries*. Available: <http://energystorage.org/energy-storage/technologies/nickel-cadmium-ni-cd-batteries>
- [35] E. S. Association. *Sodium Sulfur (NAS) Batteries*. Available: <http://energystorage.org/energy-storage/technologies/sodium-sulfur-nas-batteries>
- [36] EUROBAT, "Battery Energy Storage for Smart Grid Applications " 2013.
- [37] A. Aichhorn, M. Greenleaf, H. Li, and J. Zheng, "A cost effective battery sizing strategy based on a detailed battery lifetime model and an economic energy management strategy," in *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, 2012, pp. 1-8.
- [38] J.-H. Teng, S.-W. Luan, D.-J. Lee, and Y.-Q. Huang, "Optimal charging/discharging scheduling of battery storage systems for distribution systems interconnected with sizeable PV generation systems," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 28, pp. 1425-1433, 2013.
- [39] R. Carbone, "Grid-connected photovoltaic systems with energy storage," in *Clean Electrical Power, 2009 International Conference on*, 2009, pp. 760-767.
- [40] H. Beltran, E. Bilbao, E. Belenguer, I. Etxeberria-Otadui, and P. Rodriguez, "Evaluation of storage energy requirements for constant production in PV power plants," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 60, pp. 1225-1234, 2013.
- [41] N. Jabalameli, M. S. Masoum, F. Shahnia, and T. Hosseini Mehr, "Impact of Battery Rating on Performance of Rooftop PV Supporting Household Loads, Regulating PCC Voltage and Providing Constant Output Power to Grid," 2013.
- [42] M. Lafoz, L. Garcia-Tabares, and M. Blanco, "Energy management in solar photovoltaic plants based on ESS," in *Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th*, 2008, pp. 2481-2486.
- [43] J. Anderson. (2015). *Tesla gearing up for release of batteries for the home*. Available: <http://www.gizmag.com/tesla-home-battery/36276/>

- [44] A. Baptista, "Portugal tem a 4.^a luz mais alta e o 2.^o gás mais caro da Europa," *Jornal de Notícias*, 2015.
- [45] "Guia de soluções de Eficiência Energética," S. Electric, Ed., ed.
- [46] *Efficient energy use*. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Efficient_energy_use
- [47] *Smart Energy Solutions: Improve Energy Efficiency*. Available: http://www.ucsusa.org/clean_energy/smart-energy-solutions/improve-efficiency#.VP8IU_msUgR
- [48] V. BRYANT. (2013). *BY THE WAY, WHAT'S ENERGY EFFICIENCY?* Available: <http://smartenergyefficiency.eu/by-the-way-whats-energy-efficiency/>
- [49] *Sustainable energy*. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Sustainable_energy
- [50] H. LeHong, "Hype Cycle for the Internet of Things," 2013.
- [51] A. Soares, A. Gomes, and C. Antunes, "Domestic load characterization for demand-responsive energy management systems," in *Sustainable Systems and Technology (ISSST), 2012 IEEE International Symposium on*, 2012, pp. 1-6.
- [52] G. Electric. Available: http://www.technologyreview.com/sites/default/files/legacy/ge_nzehome_2015-final_rev1.pdf
- [53] Y. Iwafune, T. Ikegami, J. G. da Silva Fonseca, T. Oozeki, and K. Ogimoto, "Cooperative home energy management using batteries for a photovoltaic system considering the diversity of households," *Energy Conversion and Management*, vol. 96, pp. 322-329, 2015.
- [54] C. Geschickter, "Technology Overview for Home Energy Management," Gartner2012.
- [55] S. Mingay, "Hype Cycle for Sustainability, 2013," Gartner2013.
- [56] B. Asare-Bediako, W. Kling, and P. Ribeiro, "Home energy management systems: Evolution, trends and frameworks," in *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2012 47th International*, 2012, pp. 1-5.
- [57] J. Liu, Y. Xiao, S. Li, W. Liang, and C. Chen, "Cyber security and privacy issues in smart grids," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 14, pp. 981-997, 2012.
- [58] N. Javaid, I. Khan, M. Ullah, A. Mahmood, and M. Farooq, "A survey of home energy management systems in future smart grid communications," in *Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA), 2013 Eighth International Conference on*, 2013, pp. 459-464.
- [59] A. Cavoukian, J. Polonetsky, and C. Wolf, "Smartprivacy for the smart grid: embedding privacy into the design of electricity conservation," *Identity in the Information Society*, vol. 3, pp. 275-294, 2010.
- [60] T. Hubert and S. Grijalva, "Realizing smart grid benefits requires energy optimization algorithms at residential level," in *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2011 IEEE PES*, 2011, pp. 1-8.
- [61] M. H. Albadi and E. El-Saadany, "A summary of demand response in electricity markets," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, pp. 1989-1996, 2008.
- [62] F. Economics and S. First, "Demand side response in the domestic sector-a literature review of major trials," *Final Report, London, August*, 2012.
- [63] G. R. Newsham and B. G. Bowker, "The effect of utility time-varying pricing and load control strategies on residential summer peak electricity use: a review," *Energy policy*, vol. 38, pp. 3289-3296, 2010.
- [64] S. Althaher, P. Mancarella, and J. Mutale, "Automated Demand Response From Home Energy Management System Under Dynamic Pricing and Power and Comfort Constraints."
- [65] K. Bojanczyk, "Home energy management systems: vendors, technologies and opportunities, 2013-2017," *GreenTech Media Research*, vol. 29, 2013.
- [66] *Otimização*. Available: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Otimiza%C3%A7%C3%A3o>
- [67] S. P. Saramago and V. Steffen Jr, "Introdução às Técnicas de Otimização em Engenharia," *Horizonte Científico*, vol. 1, 2008.
- [68] A. Barbato, A. Capone, G. Carello, M. Delfanti, M. Merlo, and A. Zaminga, "House energy demand optimization in single and multi-user scenarios," in *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2011 IEEE International Conference on*, 2011, pp. 345-350.

- [69] A.-H. Mohsenian-Rad and A. Leon-Garcia, "Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 1, pp. 120-133, 2010.
- [70] A. Anvari-Moghaddam, H. Monsef, and A. Rahimi-Kian, "Optimal Smart Home Energy Management Considering Energy Saving and a Comfortable Lifestyle."
- [71] P. H. Shaikh, N. B. M. Nor, P. Nallagownden, I. Elamvazuthi, and T. Ibrahim, "A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 34, pp. 409-429, 2014.
- [72] J. L. Bernal-Agustín, T. Cortés-Arcos, R. Dufo-López, J. M. Lujano-Rojas, and C. Monteiro, "Modeling the Multiobjective Optimization of Electricity Consumption for Residential Consumers," *Advanced Materials Research*, vol. 748, pp. 493-497, 2013.
- [73] A. Arabali, M. Ghofrani, M. Etezadi-Amoli, M. Fadali, and Y. Baghzouz, "Genetic-algorithm-based optimization approach for energy management," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 28, pp. 162-170, 2013.
- [74] Z. Chen, L. Wu, and Y. Fu, "Real-time price-based demand response management for residential appliances via stochastic optimization and robust optimization," *Smart grid, IEEE transactions on*, vol. 3, pp. 1822-1831, 2012.
- [75] M. Pedrasa, E. Spooner, and I. MacGill, "Robust scheduling of residential distributed energy resources using a novel energy service decision-support tool," in *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2011 IEEE PES*, 2011, pp. 1-8.
- [76] P. Du and N. Lu, "Appliance commitment for household load scheduling," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 2, pp. 411-419, 2011.
- [77] A. Di Giorgio, L. Pimpinella, A. Quaresima, and S. Curti, "An event driven smart home controller enabling cost effective use of electric energy and automated demand side management," in *Control & Automation (MED), 2011 19th Mediterranean Conference on*, 2011, pp. 358-364.
- [78] T. L. Zimmerman, S. F. Smith, and A. Unahalekhaka, "CONSERVE: Client side intelligent power scheduling," in *Tenth international conference on autonomous agents and multiagent systems, Taipei, Taiwan*, 2011.
- [79] P. Stluka, D. Godbole, and T. Samad, "Energy management for buildings and microgrids," in *Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), 2011 50th IEEE Conference on*, 2011, pp. 5150-5157.
- [80] S. Hernandez, R. Romero, and D. Giral, "Optimization of the use of residential lighting with neural network," in *Computational Intelligence and Software Engineering (CiSE), 2010 International Conference on*, 2010, pp. 1-5.
- [81] A.-H. Mohsenian-Rad, V. W. Wong, J. Jatskevich, R. Schober, and A. Leon-Garcia, "Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 1, pp. 320-331, 2010.
- [82] S. Veleva and D. Davcev, "Multi-criterion mining algorithm for efficient home energy management system," in *Computational Intelligence and Informatics (CINTI), 2011 IEEE 12th International Symposium on*, 2011, pp. 481-486.